

U7 - MECANIZADO DE METALES

1. PROCESOS DE ARRANQUE DE VIRUTAS.

El mecanizado es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para quitar el exceso de material de una pieza, de tal manera que el material remanente sea la forma deseada de la pieza. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material para formar una viruta, y al removerse esta, queda expuesta una nueva superficie.

El mecanizado es uno de los procesos más importantes de manufactura, y se puede aplicar a una amplia variedad de componentes.

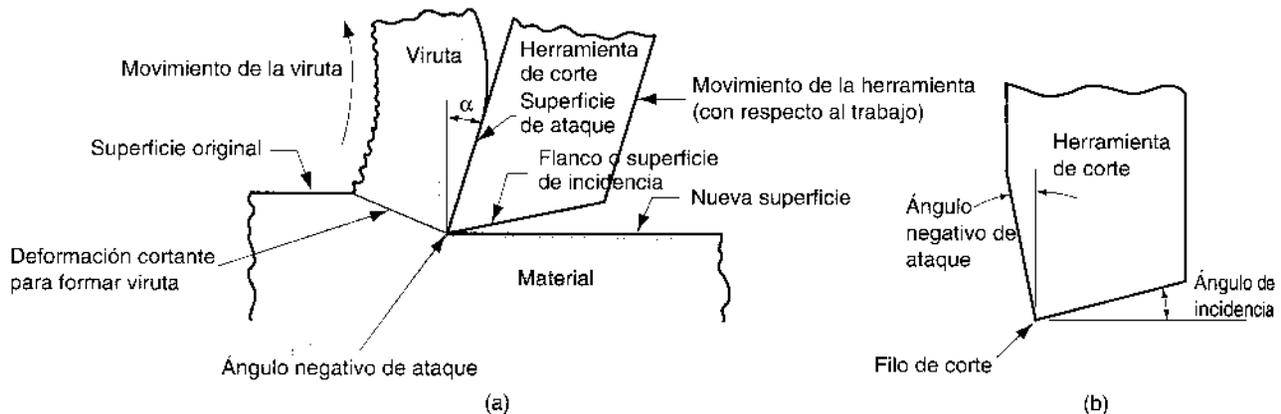


FIGURA 1 (a) Sección transversal del proceso de mecanizado. (b) Herramienta con ángulo de ataque negativo; comparada con el ángulo positivo en (a).

Prácticamente todos los metales sólidos se pueden mecanizar, inclusive los compuestos plásticos. Los cerámicos presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de los cerámicos se pueden cortar mediante procesos de mecanizado abrasivo.

El mecanizado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Combinando varias operaciones de mecanizado en secuencia se pueden producir formas de complejidad y variedad ilimitada.

El mecanizado puede producir dimensiones con tolerancias menores a 0,025 mm, y crear terminados superficiales muy tersos que pueden llegar a 0,4 μm . Algunos procesos abrasivos pueden lograr aún mejores terminados.

Debido a sus características, el mecanizado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura como fundición o deformación volumétrica como forjado y estirado de barras. Otros procesos crean la forma general de la parte y el mecanizado produce la geometría final, las dimensiones y su terminación.

El mecanizado es una familia de procesos, cuya característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta al trabajar una pieza. Para realizar la operación, se requiere un movimiento relativo entre la herramienta y la pieza. Este movimiento relativo se logra por medio de un movimiento primario llamado velocidad, y un movimiento secundario, denominado avance.

Éstos movimientos combinados con la forma de la herramienta y su penetración en la superficie de la pieza, produce la forma deseada de la superficie resultante en la pieza.

1.1. Tipos de operaciones de mecanizado

Hay muchas clases de operaciones de mecanizado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial. Pero los tres tipos más comunes son: torneado, perforado y fresado, (figura 2).

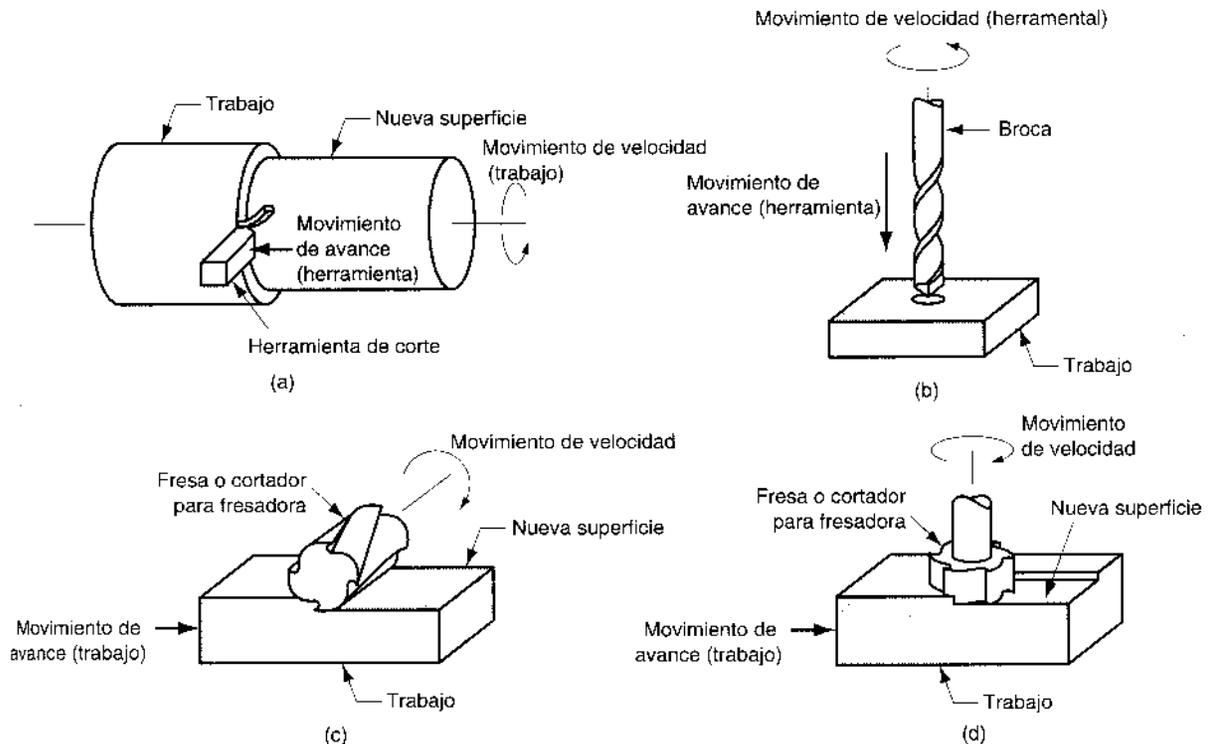


FIGURA 2. Los tres procesos más comunes de mecanizado son:
 (a) torneado,
 (b) perforado, y dos formas de fresado:
 (c) periférico y
 (d) de frente.

En el torneado se usa una herramienta de corte con un borde cortante simple para quitar material de una pieza que giratoria formando un cilindro, figura 2(a). El movimiento de rotación lo proporciona la pieza al girar, y el movimiento de avance lo realiza la herramienta, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza.

El perforado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta giratoria que tiene en su extremo dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la pieza para formar el agujero, como se ilustra en la figura 2(b).

En el fresado, una herramienta giratoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o una superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de rotación lo proporciona la fresa girar. Hay varias formas de fresado, siendo las dos básicas el fresado periférico y el fresado de frente como se muestra en la figura 2(c) y (d).

Además del torneado el perforado y el fresado, existen otras operaciones convencionales que incluyen perfilado, cepillado, escariado y aserrado. Otro grupo de procesos frecuentemente incluidos en la categoría del mecanizado, son aquellos que utilizan abrasivos para cortar materiales. Estos procesos incluyen esmerilado y operaciones similares que se usan comúnmente para lograr los mejores terminados superficiales.

1.2. La herramienta de corte

Una herramienta de corte tiene uno o más filos cortantes. El filo cortante sirve para separar una viruta del material a trabajar. Ligadas al filo cortante hay dos superficies de la herramienta: la superficie de **ataque** y el flanco o superficie de **incidencia**.

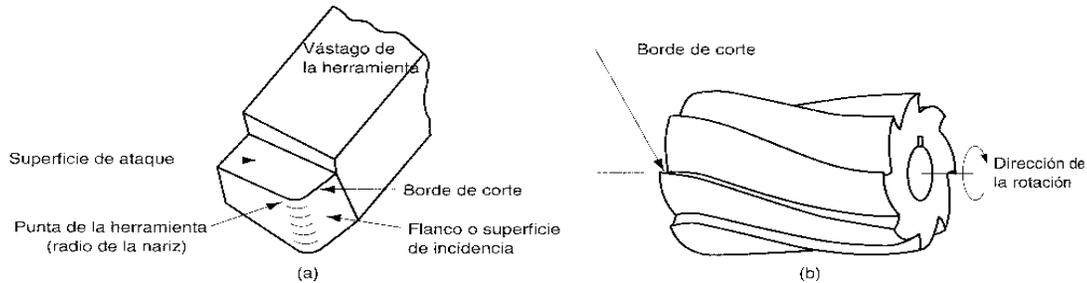


FIGURA 3 (a) Una herramienta de punta sencilla, mostrando la superficie de ataque, el flanco y la punta, y (b) una fresa helicoidal, representativa de las herramientas con bordes cortantes múltiples.

La superficie de ataque que dirige el flujo de la viruta resultante, se orienta en cierto ángulo llamado ángulo de ataque α . El ángulo se mide con respecto a un plano perpendicular a la superficie del trabajo. El ángulo de ataque puede ser positivo, como en la figura 1 (a), o negativo como en la parte (b). Entre la herramienta y la superficie del trabajo recién generada, está el ángulo de incidencia.

El diseño de la herramienta, debe tener una geometría apropiada para cortar efectivamente el material, y debe hacerse de un material que sea más duro que el material a mecanizar. En la práctica las herramientas de corte tienen geometrías complejas. Pero hay dos tipos básicos cuyos ejemplos se ilustran en la figura 3: (a) herramientas de punta sencilla y (b) herramientas de filos múltiples cortantes.

La primera se usa para operaciones de torneado, cuya punta penetra bajo la superficie original del material, siendo está generalmente redondeada (radio de la nariz).

Las herramientas de filos múltiples cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento con respecto a la parte de trabajo mediante rotación. El perforado y el fresado usan herramientas rotativas de filos múltiples cortantes. La figura 3 (b) muestra una fresa helicoidal que se usa en fresado periférico

1.3. Condiciones de corte

Para realizar una operación de mecanizado se requiere el movimiento relativo de la herramienta y el material. El movimiento primario se realiza a una cierta velocidad de corte v . Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través del material. Éste es un movimiento más lento, llamado avance f . La penetración de la herramienta de corte dentro de la superficie original del trabajo, se llama profundidad de corte d . Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte.

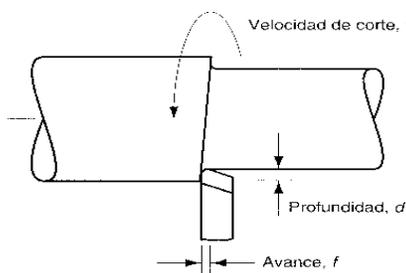


FIGURA 4 Velocidad de corte, avance y profundidad de corte en una operación de

Éstas son las tres dimensiones del proceso de mecanizado y, en ciertas operaciones se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$\text{MRR} = v.f.d \quad (1)$$

MRR = velocidad de remoción de material (mm³/seg.)

v = velocidad de corte (m/seg. o mm/seg.)

f = avance, (mm); y

d = profundidad de corte, (mm).

En otras operaciones de mecanizado, estas unidades pueden ser diferentes.

Las operaciones de mecanizado se dividen en dos categorías, según el propósito y las condiciones del corte: cortes para desbaste y cortes de terminado. Los cortes para desbaste se usan para remover grandes cantidades de material, tan rápido como sea posible a fin de producir una forma cercana a la requerida, pero dejando material en la pieza para una operación posterior de terminado.

Los cortes de terminación se usan para completar la pieza y alcanzar las dimensiones finales, las tolerancias y la rugosidad superficial. Las operaciones para desbaste se realizan a altas velocidades y profundidades, algunos de los avances van de 0,4 a 1,25 mm y profundidades de 0,5 a 2,0 mm. Las operaciones de terminación se realizan a bajas velocidades de avance y a bajas profundidades, como ser: avances de 0,125 a 0,4 mm y profundidades de 0.75 a 2.0 mm. Las velocidades de corte son más bajas en el trabajo de desbaste que en el de terminado.

Para enfriar o lubricar la herramienta de corte se aplica a ella un fluido de corte en la operación de mecanizado, además de la velocidad, avance y profundidad de corte. La determinación de usar o no un fluido de corte y, en caso afirmativo, la elección del fluido apropiado se incluyen generalmente dentro del panorama de las condiciones de corte. La selección de estas condiciones, junto con el material de trabajo y las herramientas, determina el éxito de una operación de mecanizado.

1.4. Máquinas herramienta

Se usa una máquina herramienta para sostener la pieza a elaborar, para poner en posición la herramienta con respecto a la pieza y para proporcionar la potencia para el proceso de mecanizado a la velocidad, avance, y profundidad que se han establecido. El control de la herramienta, de las condiciones de corte, del trabajo, y de la máquina herramienta permite fabricar partes con gran precisión y repetitividad a tolerancias de 0,025 mm o mejores.

El término máquina herramienta se aplica a cualquier máquina accionada por fuerza motriz que realice operaciones de mecanizado, incluso el esmerilado.

2. TEORÍA DE LA FORMACIÓN DE VIRUTA EN EL MECANIZADO DE METALES

La geometría de la mayoría de las operaciones de mecanizado práctico son complejas. Para ello se dispone de un modelo simplificado del mecanizado que desprecia muchas de las complejidades geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión, este se llama modelo de corte ortogonal (figura 5). Aun cuando un proceso real de mecanizado es tridimensional, el modelo ortogonal tiene solamente dos dimensiones para su análisis.

2.1. Modelo de corte ortogonal

El corte ortogonal usa por definición una herramienta en forma de cuña, en la cual el borde cortante es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte.

Al presionar la herramienta contra el material se forma una viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado plano de corte, éste forma un ángulo α con la superficie de trabajo. Solamente el afilado borde de corte de la herramienta hace que ocurra la falla del material, como resultado, la viruta se separa del material original.

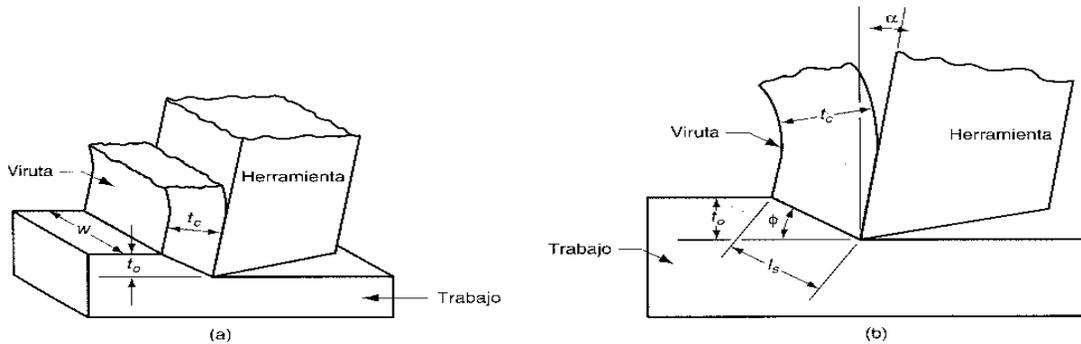


FIGURA 5. Corte ortogonal:
(a) como un proceso tridimensional y
(b) tal como se reduce a dos dimensiones en una vista lateral.

El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, por consiguiente, durante el mecanizado se realiza el trabajo de corte.

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos, el ángulo de ataque y el ángulo de incidencia. El ángulo de ataque α determina la dirección en la que fluye la viruta formada en la parte de trabajo, y el ángulo de incidencia provee un claro pequeño entre el flanco de la herramienta y la superficie de trabajo recién generada.

Durante el corte, el borde cortante de la herramienta se coloca a cierta distancia por debajo de la superficie original de la pieza. Ésta corresponde al espesor de la viruta antes de su formación t_o . Al formarse la viruta a lo largo del plano de corte incrementa su espesor a t_c . La relación de t_o y t_c se llama relación de viruta r .

$$r = t_o / t_c < 1 \quad (2)$$

Como el espesor de la viruta después del corte es siempre mayor que el espesor antes del corte, la relación de viruta siempre será menor a 1.

3. RELACIONES DE FUERZA (Ecuación de Merchant).

Consideremos las fuerzas que actúan en la viruta durante el corte ortogonal que se muestra en la figura 9(a). La fuerza R que la herramienta aplica contra la viruta se puede separar en dos componentes perpendiculares F y N .

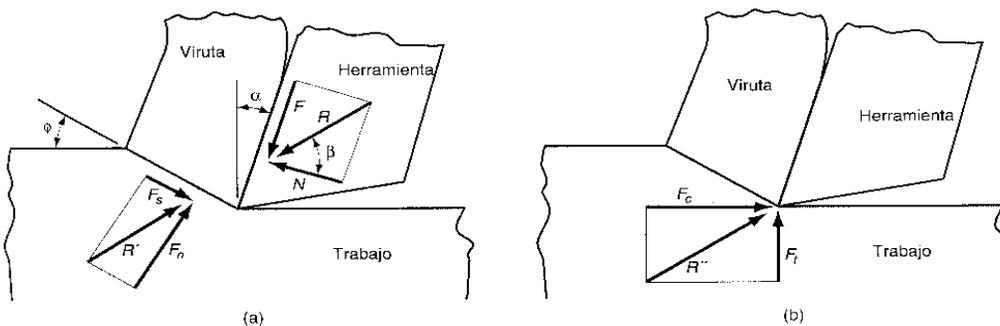


FIGURA 9. Fuerzas en el corte de metales:
(a) fuerzas que actúan sobre la viruta en el corte ortogonal y
(b) fuerzas que actúan sobre la herramienta y pueden medirse.

1) La fuerza de fricción F entre la herramienta y la viruta, es la que resiste el flujo de la viruta a lo largo de la cara inclinada de la herramienta.

2) Fuerza normal N , es perpendicular a la fuerza de fricción y puede usarse para definir el coeficiente de fricción μ entre la herramienta y la viruta:

$$\mu = F / N = \operatorname{tg} \beta \quad (5), (6)$$

Ambas se pueden sumar para formar la fuerza resultante R , la cual se orienta en un ángulo β , llamado ángulo de fricción, que se relaciona con el coeficiente de fricción.

Además de las fuerzas de la herramienta sobre la viruta, el trabajo impone dos componentes de fuerza sobre la viruta:

3) Fuerza cortante F_s . Es la fuerza que causa la deformación de corte que ocurre en el plano de corte.

4) Fuerza normal a la cortante F_n . Es la fuerza normal a la fuerza cortante.

En base a la fuerza de corte podemos definir el esfuerzo corte que actúa a lo largo del plano de corte entre el trabajo y la viruta:

$$\tau = F_s / A_s \quad (7)$$

donde A_s = área del plano del corte. Ésta se puede calcular como:

$$A_s = t_o \cdot w / \operatorname{sen} \phi \quad (8)$$

El esfuerzo cortante determinado por la ecuación 7 representa el nivel de esfuerzo requerido para realizar las operaciones de maquinado. En principio, este esfuerzo es igual al esfuerzo cortante del material de trabajo bajo las condiciones en las que ocurre el corte.

La suma vectorial de las dos fuerzas componentes F_s y F_n da por resultado la fuerza resultante R' . Para que las fuerzas que actúan sobre la viruta estén balanceadas, la resultante R' debe ser igual en magnitud, pero en dirección opuesta con la resultante R .

Ninguna de las cuatro fuerzas componentes F , N , F_s y F_n pueden medirse directamente en una operación de maquinado. Sin embargo, es posible instrumentar en la herramienta de corte un dispositivo medidor de fuerzas llamado dinamómetro, de manera que se puedan medir directamente dos fuerzas componentes adicionales. Estos dos componentes actúan sobre la herramienta

5) Fuerza de corte F_c . Es la fuerza que va en dirección del corte, la misma dirección de la velocidad de corte v .

6) Fuerza de empuje F_t . Es la fuerza que va en dirección de t_o . Es perpendicular a la fuerza de corte.

La fuerza de corte y la fuerza de empuje se muestran en la figura 9(b) junto con la fuerza resultante R'' . La dirección respectiva de estas fuerzas es conocida, así que los transductores de fuerza en el dinamómetro pueden alinearse en concordancia.

Tomando como base las fuerzas que pueden calcularse, es posible derivar las ecuaciones para relacionar los cuatro componentes de la fuerza que no pueden medirse. Usando el diagrama de fuerzas de la figura 10, se pueden definir las siguientes relaciones trigonométricas:

$$F = F_c \cdot \text{sen } \alpha + F_t \cdot \text{cos } \alpha \quad (9)$$

$$N = F_c \cdot \text{cos } \alpha - F_t \cdot \text{sen } \alpha \quad (10)$$

$$F_s = F_c \cdot \text{cos } \phi - F_t \text{sen } \phi \quad (11)$$

$$F_n = F_c \cdot \text{sen } \phi + F_t \text{cos } \phi \quad (12)$$

Si la fuerza de corte y la fuerza de empuje son conocidas, se pueden usar estas cuatro ecuaciones para calcular estimaciones de la fuerza cortante, la fuerza de fricción y la fuerza normal a la de fricción, y con base en estos estimados se pueden determinar el esfuerzo cortante y el coeficiente de fricción.

Nótese que en el caso especial del corte ortogonal, cuando el ángulo de ataque $\alpha = 0$, las ecuaciones 9 y 10 se reducen a: $F = F_t$ y $N = F_c$, respectivamente. Entonces en este caso especial, la fuerza de fricción y su fuerza normal podrían ser directamente medidas por el dinamómetro.

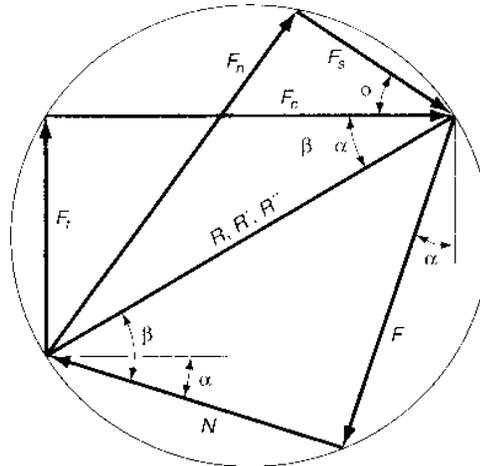


FIGURA 10. Diagrama de fuerzas mostrando las relaciones geométricas entre F , N , F_s , F_n , F_c y F_t .

3.1. La ecuación de Merchant

Una relación importante en el corte de metal fue derivada por Eugene Merchant. La derivación está basada en la suposición de corte ortogonal, pero su validez general se extiende a operaciones de maquinado en tres dimensiones. Merchant empezó con la definición de esfuerzo cortante, expresado mediante la siguiente relación derivada de la combinación de las ecuaciones 7, 8 y 11:

$$\tau = \frac{F_c \cdot \text{cos } \phi - F_t \cdot \text{sen } \phi}{(t_o \cdot w / \text{sen } \phi)} \quad (15)$$

Pensó que entre los ángulos posibles que emanan del borde cortante de la herramienta donde puede ocurrir la deformación de corte, hay un ángulo ϕ que predomina. En este ángulo, el esfuerzo cortante es justamente igual a la resistencia al corte del material de trabajo, y por esta causa la deformación cortante ocurre a este ángulo.

El esfuerzo cortante es menor que la resistencia al corte para todos los demás ángulos posibles, por lo tanto la formación de viruta no puede ocurrir a otros ángulos. En efecto, el material de trabajo seleccionará un ángulo del plano de corte que minimiza la energía. Dicho ángulo se puede determinar tomando la derivada del esfuerzo cortante τ en la ecuación 15 con respecto a ϕ , e igualando la derivada a cero. Resolviendo para ϕ , obtenemos la relación llamada ecuación de Merchant:

$$\phi = 45 + \alpha / 2 - \beta / 2 \quad (16)$$

Una de las suposiciones en que se basa la ecuación de Merchant es que la resistencia al corte del material de trabajo es una constante a la que no le afecta la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores.

Dado que estas suposiciones no corresponden a las operaciones prácticas de maquinado, la ecuación 16 debe considerarse más como una relación aproximada entre sus términos que un enunciado matemático preciso.

Lecciones basadas en la ecuación de Merchant.

El valor real de la ecuación de Merchant radica en que define la relación general entre el ángulo de ataque, la fricción herramienta-viruta y el ángulo del plano de corte. Hay dos conclusiones de esta relación:

- 1) un incremento en el ángulo de ataque hace que el ángulo del plano de corte aumente y
- 2) un decremento en el ángulo de fricción (o un decremento en el coeficiente de fricción) ocasiona que el ángulo del plano de corte aumente.

La importancia de incrementar el ángulo del plano de corte se puede apreciar en la fig.11. Si todos los otros factores permanecen constantes, un mayor ángulo del plano de corte significa una menor área de corte. Como la resistencia al corte se aplica a través de esta área, la fuerza de corte requerida para formar la viruta decrecerá cuando el área del plano de corte disminuya; lo cual facilita la realización del maquinado.

Aunque no tan obvio en la figura, un ángulo más alto del plano de corte da como resultado energías y temperaturas de corte más bajas. Éstas son dos buenas razones para tratar de hacer el ángulo del plano de corte tan grande como sea posible durante el maquinado.

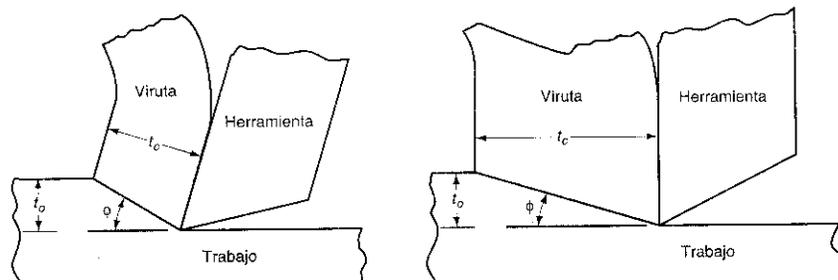


FIGURA 11. Efecto del ángulo del plano de corte ϕ ; (a) a mayor ángulo ϕ , resulta una menor área del plano de corte; (b) a menor ϕ , corresponde una mayor área del plano de corte. Nótese que el ángulo de ataque es mayor en (a), lo cual tiende a incrementar el ángulo cortante de acuerdo con la ecuación de Merchant.

Aproximación al torneado por corte ortogonal.

El modelo ortogonal se puede usar para aproximar el torneado y algunas otras operaciones de maquinado con punta sencilla mientras el avance en estas operaciones sea menor con respecto a la profundidad de corte.

De esta manera la mayoría del corte tendrá lugar en la dirección del avance, y el corte en la nariz de la herramienta será despreciable. La fig.12 indica la conversión de una situación de corte a la otra; la parte (a) muestra una operación de torneado, mientras que la parte (b) describe el caso ortogonal correspondiente.

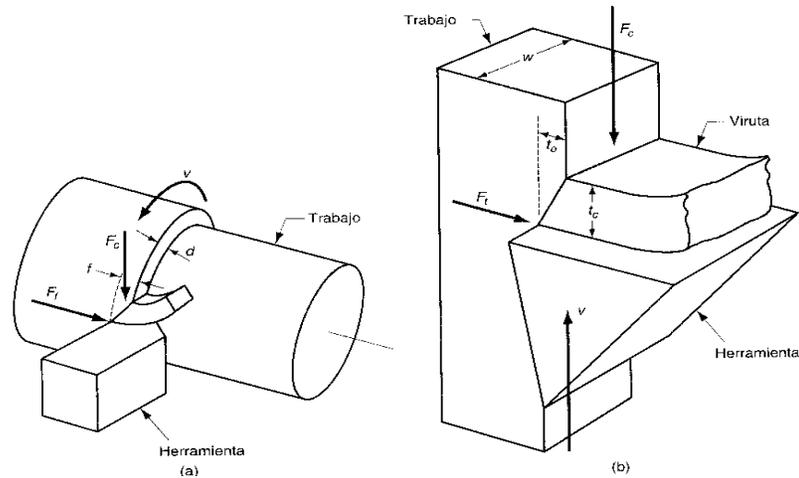


FIGURA 12. Aproximación del torneado por el modelo ortogonal: (a) torneado y (b) el corte ortogonal correspondiente.

La interpretación de las condiciones de corte es diferente en los dos casos. En el corte ortogonal, el espesor de la viruta antes del corte t_o corresponde al avance en el torneado y el ancho de corte w corresponde a la profundidad de corte en el torneado.

Además, la fuerza de empuje en el modelo ortogonal corresponde a la fuerza de avance F_f (o sea la fuerza sobre la herramienta en dirección al avance) en torneado. La velocidad de corte y la fuerza de corte tienen la misma interpretación en los dos casos. La tabla 2 resume las conversiones.

Operación de torneado		Modelo de corte ortogonal
Avance f	=	Espesor de la viruta antes del corte t_o
Profundidad d	=	Ancho del corte w
Velocidad de corte v	=	Velocidad de corte v
Fuerza de corte F_c	=	Fuerza de corte F_c
Fuerza de Avance F_f	=	Fuerza de empuje F_t

TABLA 2. Clave de conversión: operación de torneado contra corte ortogonal.

4. RELACIONES ENTRE POTENCIA Y ENERGÍA EN EL MAQUINADO

Una operación de producción en maquinado requiere potencia. Las fuerzas de corte que se encuentran en la práctica de esta operación pueden ser de varios cientos de libras. Las velocidades típicas de corte son de varios cientos de pies/min o más. El producto de la fuerza cortante y la velocidad dan la potencia (energía por unidad de tiempo) requerida para ejecutar la operación de maquinado:

$$P = F_c \cdot v \quad (17)$$

donde P = potencia de corte, pie-lb/min (N-m/s o W); F_c = fuerza de corte, lb (N); y v = velocidad de corte, pie/min (m/s). Las unidades en el sistema acostumbrado en Estados Unidos pueden convertirse a caballos de fuerza dividiéndolas por 33 000 (pie-lb/min)/hp.

$$hpc = \frac{F_c \cdot v}{33\,000} \quad (18)$$

donde hpc = potencia de corte en caballos de fuerza, hp. La potencia bruta requerida para operar la máquina herramienta es más grande que la potencia usada en el proceso de corte, debido a las pérdidas mecánicas en el motor y la transmisión de la máquina.

Estas pérdidas se pueden contabilizar por la eficiencia mecánica de la máquina herramienta.

$$hpg = \frac{hpc}{E} \quad (19)$$

donde hpg = potencia bruta del motor de la máquina herramienta en hp y E = eficiencia mecánica de la máquina herramienta. El valor típico de E para máquinas herramienta es alrededor de 90%.

Muchas veces es útil convertir la potencia en potencia por unidad de volumen de corte del metal. A ésta se le llama potencia unitaria, hpu y se define mediante

$$Hpu = \frac{hpc}{MRR} \quad (20)$$

donde MRR = velocidad de remoción de material, pulg³/Min. La velocidad de remoción de material se puede calcular como el producto de v.to.w. Ésta es la ecuación 1, usando las conversiones de la tabla 2.

La potencia unitaria se puede expresar simplemente como la potencia unitaria U también conocida como *energía específica*. La energía específica se determina por:

$$U = \frac{P}{MRR} = \frac{F_c \cdot v}{(v \cdot to \cdot w)} = \frac{F_c}{to \cdot w} \quad (21)$$

Las unidades para la energía específica son típicamente pulg-lb/pulg³ (N-m/mm³), aunque la última expresión en la ecuación 21 sugiere unidades de lb/pulg². Es más significativo retener las unidades de pulg-lb/pulg³.

La potencia unitaria en hp y la energía específica proporcionan una medida útil de la potencia (o energía) que se requiere para remover una pulgada cúbica de metal durante el maquinado. Usando esta medida se pueden comparar los diferentes materiales de trabajo en términos de sus requerimientos de potencia y energía.

La tabla 3 presenta una lista de valores de potencia unitaria y energía específica para materiales de trabajo seleccionados.

Los valores en la tabla 3 se basan en dos suposiciones:

- 1) la herramienta de corte está afilada y
- 2) el espesor de viruta antes del corte $to = 0,010$ pulg (0,25 mm).

Si no se satisfacen estas suposiciones, se tienen que hacer algunos ajustes. En una herramienta desgastada la potencia requerida para desempeñar el corte es más grande, y esto se refleja en valores de potencia unitaria y energía específica más grande.

Como una guía aproximada, los valores en la tabla deben multiplicarse por un factor entre 1 y 1,25, dependiendo del grado de uso de la herramienta. Para herramientas afiladas el factor es 1. Para herramientas casi completamente usadas en operaciones de acabado el factor es alrededor de 1,1, y para herramientas casi completamente usadas en operaciones de desbaste primario el factor es 1,25.

Material	Dureza Brinell	Potencia unitaria en hpu hp/(pulg ³ /min)	Energía específica U (N-m/mm ²)
Acero al carbono	150-200	0,6	1,6
	201-250	0,8	2,2
	251-300	1,0	2,8
Aceros aleados	200-250	0,8	2,2
	251-300	1,0	2,8
	301-350	1,3	3,6
	351-400	1,6	4,4
Hierros fundidos	125-175	0,4	1,1
	175-250	0,6	1,6
Acero inoxidable	150-250	1,0	2,8
Aluminio	50-100	0,25	0,7
Aleaciones de aluminio	100-150	0,3	0,8
Cobre (puro)		0,7	1,9
Latón	100-150	0,8	2,2
Bronce	100-150	0,8	2,2
Aleaciones de magnesio	50-100	0,15	0,4

TABLA 3. Valores de la potencia unitaria en hp y energía específica para materiales seleccionados usando herramientas de corte afiladas, y espesor de la viruta antes del corte t_0 0,010 pulg (0,25 mm).

El espesor de la viruta antes del corte t_0 afecta también los valores de la potencia unitaria y de la energía específica. Al reducirse t_0 , aumentan los requerimientos de potencia y energía. A esta relación se le llama algunas veces el *efecto del tamaño*.

Por ejemplo en el esmerilado, donde las virutas son extremadamente pequeñas en comparación con muchas otras operaciones de maquinado se requieren valores muy altos de energía específica. Los valores de hpu y U en la tabla 3 se pueden usar aún para estimar la potencia y energía, en situaciones donde t_0 no sea igual a 0,010 pulg (0,25 mm), mediante un factor de corrección que considere cualquier diferencia en el espesor de la viruta antes del corte.

La fig. 13 proporciona los valores de este factor de corrección en función a t_0 . Los valores de la potencia unitaria y la energía específica de la tabla 3 deben multiplicarse por el factor apropiado de corrección cuando t_0 sea diferente de 0,010 pulg (0,25 mm). Debe hacerse notar que, además del afilado de la herramienta y el efecto de tamaño, otros tamaños influyen los valores de la potencia unitaria y de la energía específica para una operación dada.

Estos otros factores incluyen el ángulo de ataque, la velocidad de corte y el fluido de corte. Al aumentar el ángulo de ataque o la velocidad de corte, o al añadir un fluido de corte, los valores de hpu y U se reducen ligeramente. Para nuestros propósitos, se pueden ignorar los efectos de estos factores adicionales.

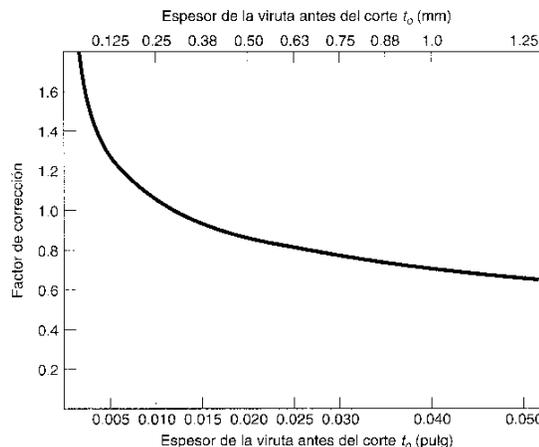


FIGURA 13. Factor de corrección para la potencia unitaria en hp y la energía específica cuando los valores del espesor de la viruta antes del corte t_0 son diferentes de 0,010 pulg (0,25 mm).

La distribución de la energía de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta varían con la velocidad de corte, como se indica en la fig.14. A velocidades bajas, una porción significativa de la energía total se absorbe en la herramienta. Pero a velocidades más altas (y a niveles de energía más altos), el movimiento rápido de la viruta a través de la superficie de ataque de la herramienta no da oportunidad a que el calor generado en la zona primaria de corte sea conducido a través de la interfase herramienta-viruta hacia la herramienta. Por lo tanto, la proporción de energía total absorbida por la herramienta se reduce y la mayor parte se la lleva la viruta. Esto ayuda a prolongar la vida de la herramienta de corte.

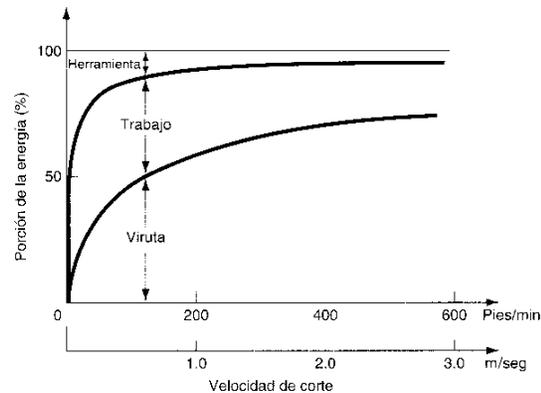


FIGURA 14. Distribución típica de la energía total de corte entre la herramienta, el trabajo y la viruta en función de la velocidad de corte.

5. TEMPERATURA DE CORTE

Casi toda la energía que se consume en el maquinado (aproximadamente el 98%) es convertida en calor. Este calor puede hacer que las temperaturas sean muy altas en la interfase herramienta-viruta; las temperaturas de más de 540 °C no son inusuales. La energía restante (cerca del 2%) se retiene como energía elástica en la viruta. En esta sección se analizarán los métodos de cálculo y de medida de las temperaturas de maquinado.

5.1. Métodos analíticos

Hay varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. El método de Cook se derivó de un análisis dimensional, usando datos experimentales para varios materiales de trabajo a fin de establecer los valores de los parámetros de la ecuación resultante. La ecuación se puede usar para predecir la elevación de la temperatura en la interfase herramienta-viruta durante el maquinado.

$$T = 0,4 \frac{U}{\rho C} (v \cdot t_0 / K)^{0,333} \quad (22)$$

donde T = aumento de la temperatura media en la interfase herramienta-viruta (°C); U = energía específica en la operación, (N-m/ mm²); v = velocidad de corte, (m/seg); t₀ espesor de la viruta antes del corte, (m); ρC = calor específico volumétrico del material de trabajo, (J/mm³-°C); K = difusividad térmica del material de trabajo, (m²/seg.).

5.2. Medición de la temperatura de corte

Se han desarrollado métodos experimentales para la medición de temperaturas en maquinado. Las técnicas de medición más frecuentemente usadas son los termopares herramienta-viruta. Este termopar toma la herramienta y la viruta como dos metales diferentes que forman una junta de termopar.

Conectando apropiadamente las terminales eléctricas a la herramienta y a la parte de trabajo (que está conectada a la viruta), se puede registrar la diferencia de potencial generada por la interfase herramienta-viruta durante el corte mediante un potenciómetro registrador u otro dispositivo colector de datos apropiado. La diferencia de potencial resultante del termopar herramienta-viruta se puede convertir al valor de temperatura correspondiente mediante ecuaciones de calibración para la combinación particular herramienta-trabajo.

El termopar herramienta-viruta se ha utilizado por los investigadores para estudiar la relación entre la temperatura y las condiciones de corte como velocidad y avance. Trigger determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente forma general:

$$T = K \cdot v^m \quad (23)$$

donde T = temperatura medida en la interfase herramienta-viruta y v = velocidad de corte. Los parámetros K y m dependen de las condiciones de corte (diferentes a v) y del material de trabajo. En la fig.15 se muestran las gráficas de la temperatura contra la velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación 23 determinadas para cada material.

Existe una relación similar entre la temperatura de corte y el avance; sin embargo, el efecto del avance sobre la temperatura no es tan fuerte como la velocidad de corte. Los resultados empíricos tienden a apoyar la validez general de la ecuación de Cook, ecuación 22.

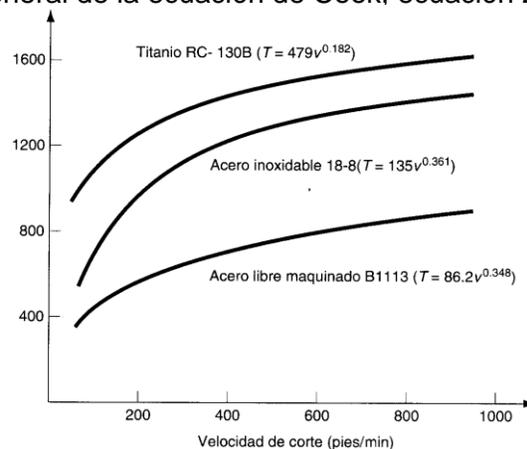


FIGURA 15. Temperaturas de corte medidas experimentalmente y graficadas contra la velocidad para tres materiales de trabajo, mostrando conformidad con la ecuación 22.

6. TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

Las operaciones de maquinado se realizan usando herramientas de corte. Las altas fuerzas y temperaturas durante el maquinado crean un ambiente muy agresivo para la herramienta. Las fuerzas de corte demasiado grandes fracturan la herramienta. Si la temperatura de corte se eleva demasiado, el material de la herramienta se ablanda y falla. Y si ninguna de estas condiciones ocasionan falla de la herramienta, de cualquier manera hay una acción continua de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla. La tecnología de las herramientas de corte tiene dos aspectos principales:

- 1) el material de la herramienta y
- 2) la geometría de la herramienta.

La primera se refiere al desarrollo de materiales que puedan soportar las fuerzas, las temperaturas y la acción de desgaste en proceso de maquinado. La segunda se ocupa de optimizar la geometría de la herramienta de corte para el material de la herramienta y para una operación dada.

Éstos son los aspectos que trataremos en este capítulo. Es conveniente empezar considerando la vida de las herramienta ya que ésta es un prerequisite en la revisión de varios temas sobre los materiales para herramientas. También se incluye una sección sobre los fluidos para corte al final de este capítulo, ya que éstos se usan frecuentemente en las operaciones de maquinado para prolongar la vida de las herramientas.

6.1. VIDA DE LAS HERRAMIENTAS

Hay tres formas posibles de falla en una herramienta de corte en maquinado:

- 1) *Falla por fractura*. Este modo ocurre cuando la fuerza de corte se hace excesiva en la punta de la herramienta, causando una falla repentina por fractura.
- 2) *Falla por temperatura*. Esta falla ocurre cuando la temperatura de corte es demasiado alta para el material de la herramienta, causando ablandamiento en la punta, deformación plástica y pérdida del filo en el borde.
- 3) *Desgaste gradual*. El desgaste gradual del borde cortante ocasiona pérdida de la forma de la herramienta, reducción en la eficiencia del corte, desgaste acelerado y falla final de la herramienta, a la falla por temperatura.

Las fallas por fractura y temperatura dan como resultado una pérdida prematura de la herramienta de corte. Estas dos formas de falla son por lo tanto indeseables. De las tres posibles formas de falla es preferible el desgaste gradual, debido a que éste permite una mayor utilización de la herramienta con la ventaja económica asociada a un uso más prolongado.

La calidad del producto también debe considerarse cuando se intenta controlar las formas de falla de la herramienta. La falla repentina de la punta de la herramienta durante un corte causa frecuentemente daños a la superficie del trabajo. Este daño requiere volver a trabajar la superficie o posiblemente desechar la parte. El daño se puede evitar si la selección de las condiciones de corte favorecen el desgaste gradual de la herramienta y evitan la fractura o la falla por temperatura, o si la herramienta se cambia antes de que ocurra una falla catastrófica del borde o filo cortante.

6.1.1. Desgaste de la herramienta

El desgaste gradual ocurre en dos lugares principales de la herramienta de corte:

- 1) en la parte superior de la superficie de ataque y
- 2) en el flanco o superficie de incidencia.

Por lo tanto, se pueden distinguir dos tipos principales de desgaste de la herramienta:

- 1) desgaste en cráter y
- 2) desgaste del flanco,

ilustrados en la fig.16. Usaremos una herramienta de punta sencilla para explicar el desgaste y el mecanismo que lo causa.

El *desgaste en cráter* es una sección cóncava de la superficie de ataque de la herramienta, formada por la acción de la viruta que se desliza contra la superficie. Los altos esfuerzos y temperaturas caracterizan a la interfase de contacto herramienta-viruta y contribuyen a la acción de desgaste. El cráter puede medirse ya sea por su profundidad o por su área.

El *desgaste del flanco* ocurre en el flanco o superficie de incidencia de la herramienta. Resulta del rozamiento entre la recién creada superficie de trabajo y la cara del flanco adyacente al borde de corte. El desgaste del flanco se mide por el ancho de la banda de desgaste, FW. A esta banda se le llama frecuentemente la *banda de desgaste*.

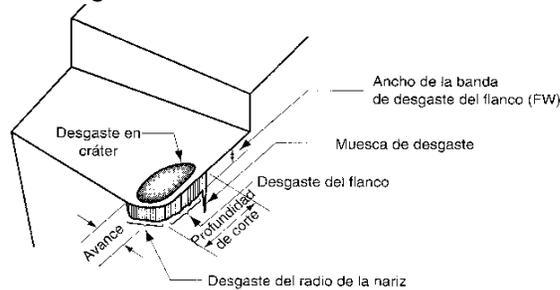


FIGURA 16. Diagrama de una herramienta desgastada que muestra los lugares principales y los tipos de desgaste que ocurren.

Se pueden identificar varias características del desgaste del flanco. En primer lugar, aparece frecuentemente un desgaste extremo en el flanco sobre el filo de corte en el sitio que corresponde a la superficie original de la parte de trabajo.

A éste se le llama *muesca de desgaste*, y ocurre porque la superficie original del trabajo es más dura y más abrasiva que el material interno. El endurecimiento por trabajo es provocado por el estirado en frío o por maquinados previos, así como por partículas de arena en la superficie de la fundición o por otras razones. Como consecuencia de la superficie más dura el desgaste se acelera en esta región.

El *desgaste del radio de la nariz* es la segunda región de desgaste del flanco que puede identificarse y conduce a la terminación del borde de corte. El mecanismo específico que ocasiona el desgaste de la herramienta se puede resumir como sigue.

Abrasión. Ésta es una acción de desgaste mecánico debido a que las partículas duras en el material de trabajo rayan y remueven pequeñas porciones de la herramienta. Esta acción abrasiva ocurre tanto en el desgaste del flanco como en el desgaste en cráter, pero predomina en el desgaste del flanco.

Adhesión. Cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre la adhesión o soldado entre ellos. Esta condición está presente entre la viruta y la superficie de ataque de la herramienta. A medida que la viruta fluye a través de la herramienta, se rompen pequeñas partículas de la herramienta y se separan de la superficie, provocando el desgaste de la superficie.

Difusión. La difusión es un intercambio de átomos a través de un límite de contacto entre dos materiales. En el caso del desgaste de la herramienta, la difusión ocurre en el límite herramienta-viruta y ocasiona que la superficie de la herramienta quede agotada por los átomos que le imparten su dureza. Conforme este proceso continúa, la superficie de la herramienta se vuelve más susceptible a la abrasión y a la adhesión. Se cree que la difusión es el principal mecanismo del desgaste en cráter.

Deformación plástica. Otro mecanismo que contribuye al desgaste de la herramienta es la deformación plástica del borde cortante. Las fuerzas de corte que actúan en el borde de corte a altas temperaturas hacen que éste se deforme plásticamente, haciéndolo más vulnerable a la abrasión de la superficie de la herramienta. La deformación plástica contribuye principalmente al desgaste del flanco.

La mayoría de estos mecanismos de desgaste se aceleran a velocidades de corte y temperaturas más altas.

6.1.2. Vida de las herramientas y la ecuación de Taylor

Al continuar el corte, los diferentes mecanismos de desgaste producen mayores niveles de desgaste en la herramienta de corte. La relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte se muestra en la fig.17. Aunque la relación que se ilustra es para el desgaste del flanco, existe una relación similar para el desgaste en cráter. Por lo general se pueden identificar tres regiones en la curva típica del crecimiento del desgaste.

La primera es el *periodo de rompimiento* inicial en el cual el borde cortante afilado se desgasta rápidamente al entrar en uso. Esta primera región ocurre en los primeros minutos de corte. A este periodo le sigue un desgaste a una velocidad más o menos uniforme y se le llama la *región de desgaste de estado estable*. En nuestra figura esta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta.

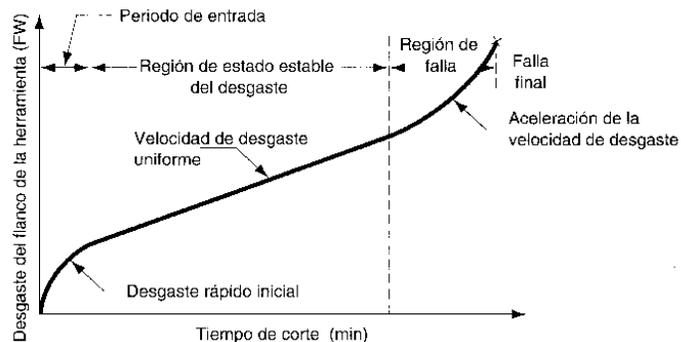


FIGURA 17. Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte. Se usa el desgaste del flanco como medida del desgaste de la herramienta. La curva del desgaste en cráter sigue una curva similar de crecimiento.

Finalmente, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del desgaste se empieza a acelerar. Esto marca el principio de la *región de falla*, en la cual las temperaturas de corte son más altas y la eficiencia general del proceso de maquinado se reduce. Si estas condiciones continúan, la herramienta finalmente fallará por un mal control en la temperatura.

La pendiente de la curva de desgaste de la herramienta en la región de estado estable se ve afectada por el material de trabajo y las condiciones de corte. Los materiales de trabajo más duros ocasionan que se incremente la velocidad de desgaste (la pendiente de la curva). Los incrementos en la velocidad, en el avance y en la profundidad de corte tienen efectos similares, pero la velocidad es el más importante de los tres.

Si se trazan curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte, el resultado aparece en la fig.18. Al aumentar las velocidades de corte se incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menos tiempo.

La *vida de la herramienta* se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede usar la herramienta. Una forma de definir la vida de la herramienta consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica.

Esto se indica en la fig.18 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción frecuentemente es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra esta falla, debido a las dificultades que acarrea el reafilado de la herramienta y a los problemas que ocasiona a la calidad de las partes de trabajo.

Como una alternativa se puede seleccionar un nivel de desgaste como criterio de la vida de la herramienta y reemplazarla cuando el desgaste alcance este nivel. Un criterio conveniente de la vida

de la herramienta es un cierto valor de desgaste del flanco o superficie de incidencia, como 0,05 mm (0,02 pulg.) que en la gráfica de la figura se ilustra como una línea horizontal.

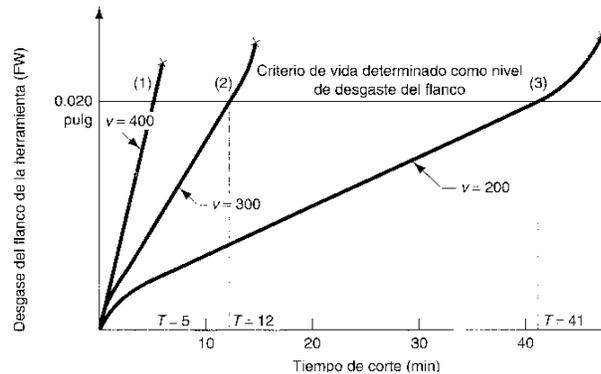


FIGURA 18. Efecto de la velocidad de corte sobre el desgaste del flanco o superficie de incidencia de la herramienta para tres velocidades de corte. Se dan valores hipotéticos de la velocidad de corte y de la vida de las herramientas para un criterio de vida de 0,02 pulg. de desgaste del flanco.

Cuando cada una de las tres curvas de desgaste interceptan la línea, se define que la vida de las herramientas correspondientes ha terminado. Si los puntos de intersección se proyectan sobre el eje del tiempo se pueden identificar los valores de la vida de la herramienta.

Ecuación de Taylor para la vida de las herramientas. Si los valores de vida de las herramientas para las tres curvas de desgaste en la fig.18 se trazan en una gráfica log-log de velocidad de corte contra la vida de las herramientas, la relación resultante es una línea recta como se muestra en la fig.19. El descubrimiento de esta relación hacia 1900 se le acredita a E. W. Taylor. Se puede expresar en forma de ecuación y se la llama ecuación de Taylor para la vida de una herramienta:

$$v \cdot T^n = C \quad (24)$$

donde v = velocidad de corte, (m/min.); T = vida de la herramienta, min.; n y C son parámetros cuyos valores dependen del avance, de la profundidad de corte, del material de corte, de la herramienta (material en particular) y del criterio usado para la vida de la herramienta. El valor de n depende del material de la herramienta, mientras que C depende más del material de trabajo y de las condiciones de corte.

La ecuación 24 establece básicamente que las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta. Al relacionar los parámetros n y C con la fig.19, n es la pendiente de la gráfica y C es la intersección sobre el eje de velocidad. C representa la velocidad de corte a la cual la herramienta duraría un minuto.

El problema con la ecuación 24 es que las unidades en el lado derecho de la ecuación no son consistentes con las unidades del lado izquierdo. Para hacer consistentes las unidades la ecuación se debe expresar en la forma:

$$v \cdot T^n = C (T^{n_{ref}}) \quad (25)$$

donde T_{ref} = un valor de referencia para C . El valor de $T_{ref} = 1$ minuto, cuando las unidades que se usan para v y T son (m/min) y min., respectivamente.

La ventaja de la ecuación 25 se comprende cuando se desea usar la ecuación de Taylor con otras unidades; por ejemplo, si la velocidad de corte se expresara como m/seg. y la vida de la herramienta como segundos, en este caso T_{ref} podría ser = 60 seg. y C podría tener el mismo valor de velocidad que en la ecuación 24, aunque convertida a unidades de m/seg.

La pendiente n podría tener el mismo valor numérico que en la ecuación 24.

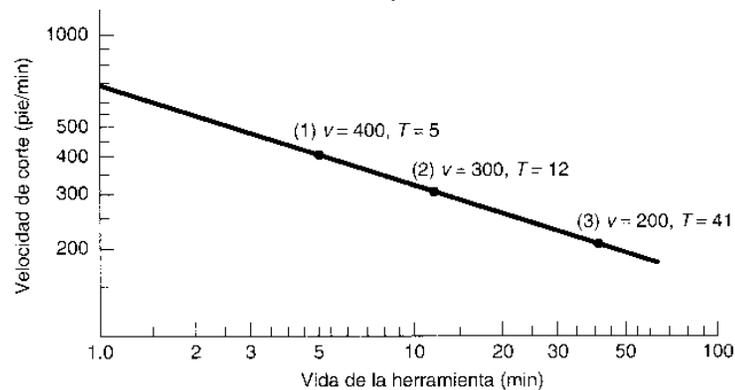


FIGURA 19. Gráfica en escala log-log de la velocidad de corte contra vida de la herramienta.

Se puede formular una versión aumentada de la ecuación 24 para incluir el efecto del avance, de la profundidad de corte y la dureza del material de trabajo:

$$v \cdot T^n \cdot f^m \cdot d^p \cdot H^q = K \cdot T_{ref}^n \cdot f_{ref}^m \cdot d_{ref}^p \cdot H_{ref}^q \quad (26)$$

donde f = avance (mm); d = profundidad de corte (mm); H = dureza expresada en una escala apropiada de dureza; m , p y q son exponentes cuyos valores se determinan experimentalmente para las condiciones de la operación; K = una constante análoga a C en la ecuación 24; f_{ref} , d_{ref} y H_{ref} son los valores de referencia para el avance, la profundidad de corte y la dureza. Los valores de m y p , los exponentes para la alimentación o avance y la profundidad son menores que 1,0.

Esto demuestra los efectos más grandes de la velocidad de corte sobre la vida de la herramienta, ya que el exponente de v es 1,0. Después de la velocidad sigue en importancia el avance, y así m tiene un valor más grande que p . El exponente para endurecimiento por trabajo q , también es menor que 1,0.

Existen dificultades para aplicar la ecuación 26 a una operación práctica de maquinado. Quizá la dificultad más grande sea la tremenda cantidad de datos de maquinado que se requieren para determinar los parámetros de la ecuación. Las variaciones en el material de trabajo y las condiciones de prueba causan también dificultades por la introducción de la variación estadística en los datos.

La ecuación es válida para indicar la tendencia general de las variables, pero no es capaz de predecir con precisión la vida de la herramienta en el desempeño. Para reducir estos problemas generalmente se eliminan algunos de los términos, lo cual hace que esta ecuación sea más manejable. Por ejemplo, si eliminamos la profundidad y la dureza, la ecuación 26 se reduce a la siguiente:

$$v \cdot T^n \cdot f^m = K \cdot T_{ref}^n \cdot f_{ref}^m \quad (27)$$

donde los términos tienen el mismo significado que antes, excepto que la constante K tendrá una interpretación diferente.

Criterios para la vida de la herramienta en producción. Aunque el desgaste en el flanco es el criterio de la vida de la herramienta en el análisis de la ecuación de Taylor, este criterio no es práctico en una fábrica a causa de las dificultades y el tiempo requerido para medir el desgaste del flanco.

A continuación se presentan nueve criterios para determinar la vida útil de la herramienta durante las operaciones de maquinado, pero algunos de ellos tienen carácter subjetivo:

1. La falla completa del borde cortante (por fractura, por temperatura o por desgaste).
2. La inspección visual por el operador de la máquina del desgaste del flanco (o desgaste en cráter) sin microscopio. Este criterio se limita al juicio y habilidad del operador para observar el desgaste de la herramienta a simple vista.
3. La prueba al tacto del borde o filo cortante (con la uña) por el operador.
4. Los cambios en el sonido emitido por la operación, a juicio del operador.
5. La viruta se vuelve más larga, enmarañada y más difícil de eliminar.
6. Degradación del acabado superficial en el trabajo.
7. Mayor consumo de potencia medida por un vatímetro conectado a la máquina herramienta.
8. Conteo de las piezas de trabajo. Se capacita al operador para que cambie la herramienta después de un número específico de partes' maquinadas.
9. Tiempo acumulado de corte, el cual es similar a la cuenta de partes del punto anterior, excepto que se registra la longitud de tiempo que ha trabajado la herramienta. Esto es posible en las máquinas herramienta controladas por computadora, la cual se programa para registrar el tiempo total de corte de cada herramienta.

6.2. MATERIALES PARA HERRAMIENTAS

Se pueden usar los tres modos de falla de la herramienta para identificar algunas de las propiedades importantes que deben poseer los materiales para herramientas:

1. *Tenacidad*. Para evitar las fallas por fractura, el material de la herramienta debe tener alta tenacidad. La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin que falle el material. Se caracteriza generalmente por una combinación de resistencia y ductilidad del material.
2. *Dureza en caliente*. La dureza en caliente es la capacidad del material para retener su dureza a altas temperaturas. Ésta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta.
3. *Resistencia al desgaste*. La dureza es la propiedad más importante que se necesita para resistir el desgaste abrasivo. Todo los materiales para herramientas de corte deben ser duros. Sin embargo, la resistencia al desgaste en el corte de metales no solamente depende de la dureza de la herramienta, sino también de otros mecanismos de desgaste. El acabado superficial de la herramienta (superficie más lisa significa coeficiente de fricción más bajo), la composición química de la herramienta y de los materiales de trabajo, y el uso de un fluido para corte son otras características que afectan la resistencia al desgaste.

Los materiales de las herramientas de corte logran esta combinación de propiedades en varios grados. En los artículos de esta sección se analizarán los siguientes materiales de herramientas de corte:

- 1) aceros al carbono y de baja aleación,
- 2) aceros rápido,
- 3) fundición de aleaciones de cobalto,
- 4) carburos cementados, cermets y carburos recubiertos,
- 5) cerámicas,
- 6) diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico.

Antes de examinar estos materiales en forma individual, será útil un breve panorama y las técnicas de comparación. La tabla 4 y la fig. 20 presentan datos sobre las propiedades de varios materiales de herramientas. Las propiedades relacionadas con los requerimientos de una herramienta de corte son: dureza, tenacidad y dureza en caliente.

La tabla 4 proporciona una lista de durezas a temperatura ambiente y de resistencia a la ruptura transversal de algunos materiales seleccionados.

Material	Dureza	Resistencia a la ruptura transversal (MPa)
Acero al carbono	60HRC	5200
Acero rápido	65HRC	4100
Aleación de fundición de cobalto	65HRC	2250
Carburo cementado (WC)		
Bajo contenido de Co	93 HRA, 1800 HK	1400
Alto contenido de Co	90 HRA, 1700 HK	2400
Cermet (TiC)	2400 HK	1700
Alúmina (A1203)	2100 HK	400
Nitruro cúbico de boro	5000 HK	700
Diamante policristalino	6000 HK	1000
Diamante natural	8000 HK	1500

TABLA 4. Valores típicos de dureza a temperatura ambiente y resistencia a la ruptura transversal para varios materiales de herramientas.

Se intenta que los valores de la dureza y de RRT sean comparativos y típicos. Las variaciones en las propiedades resultan de diferencias en composición y procesamiento.

La resistencia a la ruptura transversal es una propiedad que se usa para indicar la tenacidad de los materiales duros. La fig. 20 muestra la dureza como una función de la temperatura para varios materiales de herramientas analizados en esta sección.

Además de comparar las propiedades de los materiales, es útil compararlos en términos de los parámetros n y C en la ecuación de Taylor para la vida de las herramientas. El desarrollo de nuevos materiales para herramientas de corte ha incrementado en general los valores de estos dos parámetros. La tabla 5 proporciona una lista de valores representativos de n y C en la ecuación de Taylor para algunos materiales seleccionados de herramientas de corte.

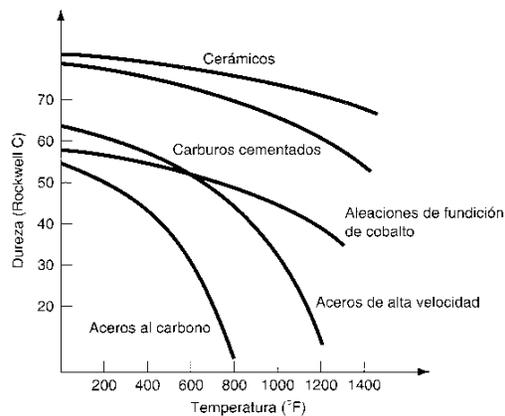


FIGURA 20. Relaciones típicas de dureza en caliente para materiales de herramienta seleccionados. Los aceros al carbono muestran una rápida pérdida de dureza conforme aumenta la temperatura. Los aceros rápido son sustancialmente mejores, mientras que los carburos cementados y los cerámicos son significativamente más duros a temperaturas elevadas

Material de herramienta		n	C (m/min)
Acero de herramienta al carbono	Corte de metales	0,1	70
	Corte de acero	0,1	20
Acero rápido	Corte de metales	0,125	120
	Corte de acero	0,125	70
Carburo cementado	Corte de metales	0,25	900
	Corte de acero	0,25	500
Cermet	Corte de acero	0,25	600
Carburo recubierto	Corte de acero	0,25	700
Cerámico	Corte de acero	0,6	3000

TABLA 5. Valores representativos de n y C en la ecuación de la vida de las herramientas de Taylor (ecuación 24) para materiales seleccionados de herramienta.

Los valores de los parámetros son aproximados para torneado con avance 0,25 mm/rev. y profundidad = 2,5 mm. El corte de metales se refiere a metales fáciles de maquinar como aluminio, latón y fundición de hierro. El corte de acero se refiere al maquinado de acero suave (no endurecido). En la práctica se pueden encontrar variaciones significativas de estos valores.

El desarrollo cronológico de los materiales de herramienta ha seguido generalmente una trayectoria en la cual los nuevos materiales han permitido velocidades de corte cada vez más altas. La tabla 6 presenta una lista de materiales de herramientas de corte, junto con sus fechas de introducción y la velocidad de corte máxima disponible. Se han registrado incrementos dramáticos en la productividad del maquinado debido a los avances en la tecnología de materiales. En la práctica, las máquinas herramienta no siempre han ido al paso de la tecnología de las herramientas de corte. Las limitaciones en la potencia, en la rigidez de las máquinas herramienta, en los rodamientos de las flechas de transmisión y el uso extendido de equipos viejos en la industria estadounidense son factores que han influido en el desaprovechamiento de las posibilidades de las altas velocidades disponibles en las herramientas de corte.

La evolución tecnológica de los materiales de herramienta se caracteriza por un fenómeno interesante. Algunos de los materiales para herramienta desarrollados hace muchos años siguen utilizándose extensamente; no se han reemplazado necesariamente por materiales más nuevos. Por ejemplo, el acero rápido, desarrollado alrededor de 1900, se sigue usando ampliamente en la industria como material de herramienta de corte. Se han hecho mejoras en los ingredientes de aleación y en el procesado metalúrgico de los aceros rápido, es por esto que aún permanecen competitivos en una variedad de aplicaciones.

Material de herramienta		Año de uso inicial	Velocidad permisible de corte m/min
Acero de herramienta al carbono	Corte de metales	1800	10
	Corte de acero		5
Acero rápido	Corte de metales	1900	25-65
	Corte de acero		17-33
Aleaciones de fundición de cobalto	Corte de metales	1915	50-200
	Corte de acero		33-100
Carburos cementados (WC)	Corte de metales	1930	330-650
	Corte de acero	1940	100-300
Cermets (TiC)	Corte de acero	1950	165-400
Cerámicos (Al ₂ O ₃)	Corte de acero	1955	330-650
Diamantes sintéticos	Corte de metales	1954, 1973	390-1300
Nitruro de boro cúbico	Corte de acero	1969	500-800
Carburos recubiertos	Corte de acero	1990	165-400

TABLA 6. Materiales de herramientas de corte con sus datos aproximados de uso inicial y velocidades de corte permisibles.

Las velocidades permisibles de corte se expresan como una escala de valores, debido a la variedad de materiales de trabajo y aplicaciones maquinadas con estas herramientas. Los valores se destinan a representar velocidades típicas y comparativas, no límites absolutos. Las herramientas cerámicas se usan normalmente con avances y profundidades más bajas debido a su fragilidad. Los carburos recubiertos se usan normalmente como sustitutos de los carburos cementados en su grado de corte de acero.

6.2.1. Aceros al carbono y de baja aleación

Antes del desarrollo del acero rápido, los únicos materiales para corte de metales eran el acero al carbono y el acero de Mushet. En la actualidad estos aceros se usan esporádicamente en las aplicaciones industriales del maquinado de metales. Los aceros al carbono que se usaban como herramientas de corte podían tratarse técnicamente para adquirir una dureza relativamente alta (Rockwell C 60) debido a su relativamente alto contenido de carbono.

Sin embargo, a causa de los bajos niveles de aleación tienen una dureza en caliente muy pobre (fig. 20), lo cual los hace inútiles en el corte de metales, excepto a velocidades demasiado bajas según los estándares actuales. El acero de Mushet ha sido desplazado por los avances en la metalurgia del acero.

6.2.2. Aceros rápidos

Los aceros rápidos o de alta velocidad, AAV (en inglés, HSS), son aceros de herramienta altamente aleados, capaces de mantener su dureza a elevadas temperaturas mejor que los aceros de baja aleación y poseen alto contenido de carbono. Su buena dureza en caliente permite el uso de estas herramientas a velocidades de corte más altas. Al compararlos con los materiales de herramientas usados antes de su desarrollo, se merecieron el nombre de "rápidos" o de "alta velocidad". Se dispone de una amplia variedad de aceros rápidos, pero se pueden dividir en dos tipos básicos:

- 1) tipo tungsteno, designados como grado-T por el American Iron and Steel Institute (AISI); y
- 2) tipo molibdeno, designados como grado-M por el AISI.

Los HSS tipo tungsteno contienen tungsteno como su principal ingrediente de aleación en proporciones del 12 al 20%. Los elementos adicionales de aleación son el cromo Cr cerca de 4%, y el vanadio V, en una escala de 1 a 2%. Uno de los HSS originales y mejor conocidos es el grado T1 o acero rápido 18-4-1, el cual contiene 18% de W, 4% de Cr y 1% de V.

Los HSS grados molibdeno contienen combinaciones de tungsteno y molibdeno (Mo) en una combinación típica de 6% W y 5% Mo, más los mismos elementos de aleación adicionales. Las funciones de cada elemento aleado en aceros rápido (HSS) se listan en la tabla 7.

Elemento de aleación	Funciones en el acero rápido
Tungsteno	Incremento la dureza en caliente. Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Molibdeno	Incremento la dureza en caliente. Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS.
Cromo	Profundiza la templabilidad durante el tratamiento térmico. Mejora la resistencia a la abrasión a través de la formación de carburos duros en HSS. Resistencia a la corrosión (efecto menor)
Vanadio	Se combina con el carbono para resistencia al desgaste. Retarda el crecimiento de los granos para mejor tenacidad.
Cobalto	Incremento la dureza en caliente.
Carbono	Elemento principal de endurecimiento del acero. Proporciona carbono disponible para formar carburos con otros elementos de aleación e incremento la resistencia al desgaste.

TABLA 7. Elementos de aleación en aceros rápido y sus efectos sobre sus propiedades y procesamiento.

Comercialmente, el acero rápido es uno de los más importantes materiales de herramientas de corte que se usan actualmente, y a pesar haberse introducido hace cerca de un siglo, es especialmente apropiado para aplicaciones que involucran herramientas de formas complicadas como taladros, tarrajas, fresas y escariadores. Estas complejas herramientas son generalmente más fáciles y menos costosas de producir con HSS que con otros materiales de herramienta. Se pueden tratar térmicamente para que el filo de corte adquiera muy buena dureza (Rockwell C 65), y también mantienen buena tenacidad en las porciones internas de la herramienta. Los buriles de acero rápido tienen mejor tenacidad que muchos de los materiales que poseen mayor dureza y no están fabricados con acero grado herramienta, pero se emplean para maquinado, como carburos cementados y cerámicas. Aun para herramientas de punta sencilla, los aceros rápido son muy populares entre los maquinadores debido a la facilidad con que se puede tallar cualquier forma en la punta de la herramienta.

A través de los años se han hecho algunas mejoras en la formulación metalúrgica de los HSS, por lo cual esta clase de materiales de herramienta permanece competitiva para muchas aplicaciones. Las herramientas HSS, incluyendo las brocas, se recubren también frecuentemente con una delgada película de nitruro de titanio (TiN) para obtener una significativa mejoría en su desempeño de corte. Generalmente se usan procesos de deposición física de vapor para realizar estos recubrimientos.

6.2.3. Aleaciones de fundición de cobalto

Los recubrimientos de aleación de cobalto contienen de 40 a 50% de cobalto; de 25 a 35% de cromo; y tungsteno, por lo general del 15 al 20%, con trazas de otros elementos. Estas herramientas se hacen en la forma deseada a través de fundición en moldes de grafito y después se esmerilan para darles el tamaño y afilado final. La resistencia al desgaste es mejor que la del acero rápido, pero no tanto como la de los carburos cementados. La tenacidad de las herramientas de fundición de cobalto es mejor que la de los carburos, pero no tan buena como la de los HSS. La dureza en caliente se sitúa también entre los dos materiales.

Como se puede esperar de sus propiedades, las aplicaciones de las herramientas de fundición de cobalto están generalmente entre las de los aceros rápido y las de los carburos cementados. Son capaces de cortes burdos pesados a velocidades mayores que las de los HSS y avances mayores que la de los carburos. Los materiales de trabajo incluyen aceros y metales, así como materiales no metálicos como plásticos y grafito. En la actualidad, las herramientas de fundición de cobalto no son comercialmente tan importantes como los aceros rápido o los carburos cementados. Estos últimos se introdujeron alrededor de 1915 como un material de herramienta que podría permitir velocidades de corte más altas que los HSS; pero los carburos se desarrollaron posteriormente y probaron ser superiores a las aleaciones de fundición de cobalto en la mayoría de las situaciones de corte.

6.2.4. Carburos cementados, cermets y carburos recubiertos

Los cermets son compuestos de materiales cerámicas y metálicos. Los carburos cementados se incluyen técnicamente dentro de esta definición, sin embargo, los cermets basados en WC-Co, incluyendo WC-TiC-TaC-Co, se conocen como carburos (carburos cementados) de uso común. En la terminología de las herramientas de corte, el término cermet se aplica a los compuestos cerámico-metálicos que contienen TiC, TiN y otros materiales cerámicas, excepto el WC. Un avance en los materiales de corte involucro la aplicación de recubrimientos muy delgados a un sustrato de WC-Co. Estas herramientas se llaman carburos recubiertos. De esta manera tenemos tres materiales estrechamente relacionados que se analizarán en esta sección:

- 1) carburos cementados,
- 2) cermets y
- 3) carburos recubiertos.

Carburos cementados. Los carburos cementados son una clase de materiales duros para herramienta formulados con carburo de tungsteno (WC), y manufacturados con técnicas de metalurgia de polvo en las que se utiliza el cobalto (Co) como aglutinante. Además del WC, puede haber otros compuestos de carburo en la mezcla, como carburo de titanio (TiC) o carburo de tantalio (TaC).

Las primeras herramientas de corte de carburo cementado se hicieron de WC-Co y se usaron para maquinar fundiciones de hierro, excluyendo al acero y a todo tipo de materiales ingenieriles, a velocidades de corte más rápidas que las que eran posibles con los aceros rápido y las aleaciones de fundición de cobalto. Sin embargo, cuando se usaron directamente las herramientas WC-Co para maquinar acero, apareció el desgaste en cráter, que condujo a fallas prematuras en las herramientas.

La fuerte afinidad química entre el acero y el WC-Co provoca un desgaste acelerado por adhesión y difusión en la interfase herramienta-viruta para esta combinación trabajo-herramienta. Consecuentemente, las herramientas fabricadas solamente con WC-Co no se pueden usar de manera efectiva para maquinar el acero. Posteriormente se descubrió que la adición de carburo de titanio (TiC) y de carburo de tantalio (TaC) a la herramienta de WC-Co retardaba significativamente la velocidad de desgaste en cráter cuando se cortaba acero.

Estas nuevas herramientas de WC-TiC-TaC-Co se podían usar para maquinar acero. El resultado es que los carburos cementados se dividen en dos tipos básicos:

- 1) grados de corte para material que no incluyan el acero, los cuales consisten solamente en WC-Co y
- 2) grados de corte para acero con combinaciones de TiC y TaC añadidos al WC-Co.

Las propiedades generales de los dos tipos de carburos cementados son similares:

- 1) alta resistencia a la compresión, pero baja resistencia a la tensión moderada;
- 2) alta dureza (90 a 95 HRA);
- 3) buena dureza en caliente;
- 4) buena resistencia al desgaste;
- 5) alta conductividad térmica;
- 6) alto módulo de elasticidad, con valores de E cercanos a 600×10^3 MPa y
- 7) tenacidad más baja que los aceros rápidos.

Los grados de corte para materiales que no incluyen el acero se refieren a aquellos carburos cementados que son apropiados para maquinar aluminio, latón, cobre, magnesio, titanio y otros metales no ferrosos; el hierro fundido se incluye irregularmente en este grupo de materiales de trabajo. En los grados de corte de material no acerado, el tamaño de los granos y el contenido de cobalto son los factores que influyen en las propiedades del material de carburo cementado. Al incrementarse el tamaño del grano disminuye la dureza y la dureza en caliente, pero aumenta la resistencia a la ruptura transversal.

Al aumentar el contenido de cobalto, la resistencia a la ruptura transversal mejora a expensas de la dureza y la resistencia al desgaste. Con altos porcentajes de cobalto (7 a 15%), el carburo cementado tiene alta resistencia a la ruptura transversal, pero su dureza es relativamente baja (véase tabla 7); mientras que un bajo contenido de cobalto (3 a 6%) incrementa la dureza y reduce la resistencia a la ruptura transversal. Los carburos cementados con alto contenido de cobalto se usan para operaciones bastas y cortes interrumpidos (como en fresado), mientras que los carburos con bajo contenido de cobalto (dureza y resistencia al desgaste más altas) se usan para cortes de acabado.

Los grados de corte de acero se usan para aleaciones de acero de bajo carbono, inoxidable y otras. Para estos grados de carburo, el carburo de titanio o el carburo de tantalio se sustituyen por algo de carburo de tungsteno. El TiC es el aditivo más popular en la mayoría de las aplicaciones. Se puede reemplazar típicamente del 10 al 25 % de WC mediante combinaciones de TiC y TaC. Esta composición incrementa la resistencia al desgaste en cráter para el corte de acero, pero tiende a afectar adversamente la resistencia al desgaste del flanco o superficie de incidencia en aplicaciones de corte de materiales que no son acerados. Es por esto que se necesitan dos grados de carburo cementado.

Hay tantas composiciones posibles de carburo cementado, que en Estados Unidos se desarrolló un sistema de clasificación, conocido como el sistema ANSI de grados-C, para ayudar a los usuarios a decidir sobre el grado más apropiado para las aplicaciones de maquinado.

La fig. 21 presenta el sistema de grados-C junto con algunos comentarios sobre las aplicaciones, propiedades y composición. La figura resume muchas de las observaciones hechas en los párrafos precedentes. El sistema de clasificación se usa también para indicar las aplicaciones de los cermetes y de los carburos recubiertos.

Cermetes. Aunque los carburos cementados se clasifican técnicamente como compuestos cermetes, en la tecnología de herramientas de corte, el término cermet generalmente se reserva para las combinaciones de TiC, TiN y carbonitruro de titanio (TiCN) usando níquel y/o molibdeno como aglutinante. En otras palabras, los cermetes excluyen los compuestos metálicos que se basan principalmente en WC-Co. Las aplicaciones de los cermetes incluyen acabados a altas velocidades y semiterminado de aceros, aceros inoxidable y fundiciones de hierro. Estas herramientas permiten velocidades más altas, comparadas con las que permiten generalmente los carburos de grado corte de acero. Normalmente se usan menores avances y así se obtienen mejores superficies de acabado, eliminando muchas veces la necesidad del esmerilado.

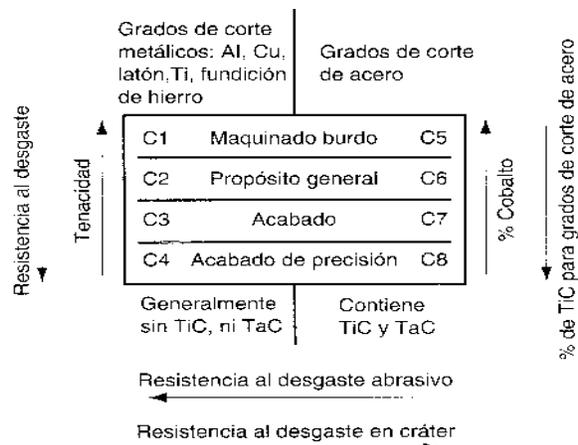


FIGURA 21. Clasificación de los carburos cementados por el sistema de grados-C.

Carburos recubiertos. Alrededor de 1970 se desarrollaron los carburos recubiertos, esto representó un avance significativo en la tecnología de herramientas de corte. Los carburos recubiertos son insertos de carburo cementado recubierto con una o más capas delgadas de un material resistente al desgaste como carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio (Al_2O_3). El recubrimiento se aplica al sustrato por deposición química de vapor o deposición física de vapor. El espesor del recubrimiento es solamente de 2,5 a 13 μm . Se ha observado que los recubrimientos más gruesos tienden a ser frágiles y producen agrietamientos, despostilladuras y separación de la base del inserto.

La primera generación de carburos recubiertos tenía solamente una capa de recubrimiento de (TiC, TiN, o Al_2O_3), este tipo de herramienta se encuentra todavía en uso. Más recientemente se han desarrollado insertos recubiertos que consisten en múltiples capas. La primera capa se aplica a la base de WC-Co y consiste por lo general en TiN o TiCN debido a su buena adhesión y a su coeficiente de expansión térmica similar. Posteriormente se aplican capas adicionales de varias combinaciones de TiN, TiCN y Al_2O_3 .

Los carburos recubiertos se usan para maquinar fundiciones de hierro y acero en operaciones de torneado y fresado. Se aplican mejor a altas velocidades de corte en situaciones donde las fuerzas dinámicas y el choque térmico son mínimos. Si estas condiciones se vuelven severas como en algunas operaciones interrumpidas de corte, pueden ocurrir despostilladuras de los recubrimientos ocasionando una falla prematura de la herramienta. En estas situaciones son preferibles los carburos sin recubrir y formulados para una mayor tenacidad.

Cuando las herramientas de carburo recubierto se aplican correctamente, permiten incrementar las velocidades permisibles de corte con respecto a los carburos cementados no recubiertos. La tabla 6 indica las posibles velocidades típicas.

El uso de las herramientas de carburo recubierto se está extendiendo a metales no ferrosos y aplicaciones no metálicas para mejorar la vida de la herramienta, así como para obtener velocidades de corte más altas. Se requieren diferentes materiales de recubrimiento, como el carburo de cromo (CrC), nitruro de circonio (ZrN) y diamante.

6.2.5. Cerámicos

Las herramientas de corte hechas de cerámicas se usaron comercialmente por primera vez en Estados Unidos a mediados de la década de los cincuenta, aunque su desarrollo y uso en Europa se remonta a principios de 1900. En la actualidad las herramientas de corte a base de materiales cerámicos están compuestas primariamente de óxido de aluminio de grano fino, prensado y sinterizado a altas presiones y temperaturas sin aglutinante en forma de inserto. El óxido de aluminio es por lo general muy puro (99% típicamente), aunque algunos fabricantes añaden otros óxidos, como óxido de circonio en pequeñas cantidades. Es importante usar polvos de alúmina muy finos en la producción de herramientas cerámicas y maximizar la densidad de la mezcla a través de la compactación a alta presión, a fin de mejorar la baja tenacidad del material.

Las herramientas de corte de óxido de aluminio tienen más éxito en el torneado a altas velocidades de fundiciones de hierro y acero. Dichas herramientas se pueden usar para operaciones de acabado en el tomo en aceros endurecidos, donde las velocidades de corte son altas- y tanto el avance como la profundidad de corte son bajos- y se emplean instalaciones rígidas de trabajo. Muchas fallas por fractura prematura de herramientas cerámicas se deben a máquinas herramientas no rígidas, que sujetan a las herramientas a fuerzas dinámicas. Cuando las herramientas cerámicas de corte se aplican apropiadamente, pueden usarse para obtener buen acabado en las superficies. No se recomiendan las herramientas cerámicas para operaciones interrumpidas de corte basto (por ejemplo, fresado basto) debido a su baja tenacidad. Además de las aplicaciones de los insertos de óxido de aluminio en operaciones de maquinado convencional, el óxido de aluminio se usa ampliamente como un abrasivo en esmerilado y otros procesos abrasivos.

Otras herramientas cerámicas de corte disponibles comercialmente incluyen: nitruro de silicio (SiN); *sialon*, que consiste en nitruro de silicio y óxido de aluminio (SiN- Al₂O₃); óxido de aluminio y carburo de titanio (Al₂O₃ -TiC), y óxido de aluminio reforzado con cristales simples de carburo de silicio. Estas herramientas se diseñan generalmente para aplicaciones especiales.

6.2.6. Diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico

El diamante es el material más duro que se conoce. Según algunas medidas de dureza, el diamante es cerca de tres o cuatro veces más duro que el carburo de tungsteno o que el óxido de aluminio. Como la alta dureza es una de las propiedades deseables de las herramientas de corte, es natural pensar en los diamantes para aplicaciones de esmerilado y maquinado. Las herramientas de corte de diamante sintético se hacen con diamante policristalino sintetizado y se remontan a los primeros años de la década de los setenta. El *diamante policristalino sintetizado* se fabrica mediante la sinterización de polvos finos de cristales de diamante granulado a altas temperaturas y presiones en la forma deseada, no se usa aglutinante. Los cristales tienen una orientación aleatoria y esto añade considerable tenacidad a las herramientas de diamante policristalino sintetizado, en relación con los cristales simples de diamante. Los insertos se hacen depositando una capa de diamante policristalino sinterizado (de 0,5 mm de grueso aproximadamente) sobre la superficie de una base de carburo cementado. También se han hecho insertos muy pequeños de diamante policristalino sintetizado al 100%.

Las aplicaciones de las herramientas de corte de diamante incluyen el maquinado a alta velocidad de metales no ferrosos y abrasivos no metálicos como fibras de vidrio y grafito. No es práctico maquinar el acero y otros metales ferrosos, así como las aleaciones basadas en níquel, con herramientas de diamante policristalino sintetizado debido a la afinidad química que existe entre estos metales y el carbono (el diamante, ante todo, es carbono).

Después del diamante, el material más duro conocido es el *nitruro de boro cúbico* y su fabricación en forma de herramientas de corte es básicamente la misma que se usa para el diamante policristalino sintetizado, esto es, recubrimientos sobre insertos de WC-Co. El nitruro de boro cúbico (cuyo símbolo es CBN) no reacciona químicamente con el hierro y el níquel como lo hace el diamante; por lo tanto, las aplicaciones de herramientas recubiertas de CBN se aplican para maquinar acero y aleaciones basadas en níquel. Como se puede imaginar, las herramientas de diamante y CBN son costosas, por consiguiente se debe justificar el costo de sus aplicaciones y de las herramientas adicionales.

6.3. GEOMETRÍA DE LAS HERRAMIENTAS

La herramienta de corte debe tener una forma apropiada para las aplicaciones de maquinado. Una forma importante de clasificar las herramientas de corte es atendiendo a los procesos de maquinado. De esta forma tenemos herramientas para torneado, herramientas para trozado, fresas, brocas, escariadores, tarrajas y muchas otras herramientas de corte, cuyo nombre deriva de la operación en que se usa cada una con su geometría propia y única.

Como se indica en la sección 6.1.2. las herramientas de corte se pueden dividir en dos categorías: de punta sencilla y de bordes o filos de corte múltiples. Las herramientas de torneado representan generalmente el primer tipo, mientras que las brocas y las fresas representan el segundo. En esta sección, nos enfocaremos en las herramientas de punta sencilla y examinaremos los aspectos de su geometría. Muchos de los principios que se aplican a las herramientas de punta sencilla se aplican a otros tipos de herramientas de corte, simplemente porque el mecanismo de la formación de viruta es básicamente el mismo para todas las operaciones de maquinado.

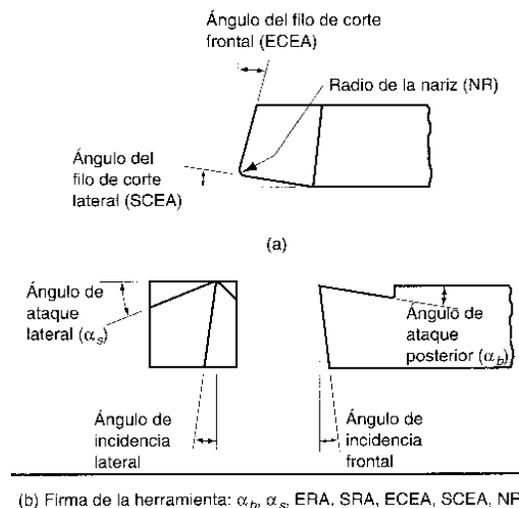


FIGURA 22. (a) Siete elementos de la geometría de una herramienta de punta sencilla y (b) la firma convencional de la herramienta que define los siete elementos.

Geometría de la herramienta de punta sencilla. La forma general de una herramienta de punta sencilla se ilustra en la fig. 5. Un diagrama más detallado se muestra en la fig. 22. Ya antes hemos considerado el ángulo de inclinación de una herramienta de corte como un parámetro. En una herramienta de punta sencilla, la orientación de la superficie de ataque se define por dos ángulos, el *ángulo de ataque posterior* (α_p) y el *ángulo de ataque lateral* (α_s). Estos dos ángulos tienen una influencia determinante en la dirección del flujo de la viruta sobre la cara o superficie de ataque.

La superficie del flanco o incidencia de la herramienta se define por el *ángulo de incidencia frontal*, AIF y el *ángulo de incidencia lateral*, AIL. Estos ángulos determinan la magnitud de la luz entre la herramienta y la superficie de trabajo recién creada. El borde de corte de una herramienta de punta sencilla se divide en dos secciones, el borde de corte lateral y el borde de corte frontal. Estas secciones están separadas por la punta de la herramienta que tiene un cierto radio, llamado radio de la nariz. El *ángulo del filo de corte lateral*, AFCL, determina la entrada de la herramienta en el material y puede usarse para reducir la fuerza repentina que experimenta la herramienta al entrar en la parte de trabajo. El *radio de la nariz*, RN, determina en gran parte la textura de la superficie generada en la operación. Una herramienta muy apuntada (pequeño radio de nariz) produce marcas de avance muy pronunciadas en la superficie. El *ángulo del filo de corte frontal* AFCF, proporciona una luz entre el borde de salida de la herramienta y la superficie de trabajo recientemente generada, reduciendo así el roce y la fricción contra la superficie.

Para una herramienta de punta sencilla hay siete elementos que definen su geometría. Cuando se especifican en el siguiente orden se llaman colectivamente *la firma de la geometría de la herramienta*: ángulo de ataque posterior, ángulo de ataque lateral, ángulo de incidencia frontal, ángulo de incidencia lateral, ángulo del filo de corte frontal, ángulo del filo de corte lateral y radio de la nariz. Por ejemplo, una herramienta de punta sencilla que se usa en torneado debe tener la siguiente firma:

5, 5, 7, 7, 20, 15, 0,8 mm.

Rompe virutas. La eliminación de la viruta es un problema que se encuentra frecuentemente en torneado y otras operaciones continuas. Frecuentemente se generan largas tiras de viruta, especialmente cuando se tornean materiales dúctiles a altas velocidades. Estas virutas representan un peligro para el operador de la máquina y para el acabado de la parte de trabajo, e interfieren con la operación automática del proceso de torneado. Con frecuencia se usan *rompe virutas* junto con las herramientas de punta sencilla, de esta forma se fuerza a la viruta a enrollarse más cerradamente de lo normal, causando su fractura.

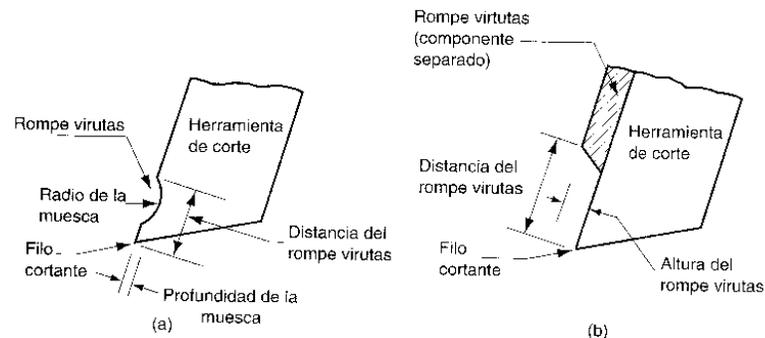


FIGURA 23. Dos métodos para romper la viruta en las herramientas de punta sencilla: (a) tipo muesca y (b) obstrucción.

Hay dos diseños comunes del rompe virutas para herramientas de torneado de punta sencilla, como se ilustra en la fig. 23: (a) rompe virutas tipo muesca, diseñado dentro de la misma herramienta de corte; y (b) rompe virutas tipo obstrucción, diseñado como un dispositivo adicional sobre la superficie de ataque de la herramienta. La distancia del rompe virutas se puede ajustar en el dispositivo tipo obstrucción para diferentes condiciones de corte.

Efecto del material de la herramienta sobre la geometría de la herramienta En nuestra revisión de la ecuación de Merchant se señaló que generalmente es deseable un ángulo de ataque positivo para reducir las fuerzas de corte, la temperatura y el consumo de potencia. Las herramientas de corte de acero rápido se hacen casi siempre con ángulos positivos de ataque, fluctuando típicamente entre +5° a +20°.

Los HSS tienen buena resistencia y tenacidad, de manera que las secciones más delgadas de la herramienta creadas por altos ángulos de ataque positivo por lo general no causan problemas de fractura en las herramientas. Las herramientas de HSS se hacen predominantemente de una sola pieza. Se puede controlar el tratamiento térmico de los aceros rápidos para suministrar un filo de corte duro; esto mantiene un núcleo interior tenaz.

Con el desarrollo de materiales muy duros para herramientas (carburos cementados, carburos recubiertos y cerámicas) se requirieron cambios en la geometría de las herramientas. Estos materiales, como grupo, tienen durezas más altas y tenacidades más bajas que los aceros rápidos. Sus resistencias al corte y a la tensión también son bajas con respecto a su resistencia a la compresión y sus propiedades no pueden manipularse mediante tratamiento térmico como las de los HSS. Finalmente, el costo por kg de estos materiales muy duros es más alto que el costo de los aceros rápidos. Estos factores han afectado el diseño de las herramientas de corte para los materiales de herramientas duras en varias formas.

En primer lugar, los materiales muy duros se deben diseñar con ángulos de ataque negativos o ligeramente positivos. Este cambio tiende a cargar la herramienta más a la compresión y menos al corte, favoreciendo la alta resistencia a la compresión de estos materiales más duros. Por ejemplo, los carburos cementados se usan con ángulos de ataque típicos en la escala de -5° a $+10^\circ$. Los cerámicas tienen ángulos de ataque que fluctúan entre -5° y -15° . Los ángulos de incidencia se hacen tan pequeños como sea posible (típicamente 5°) para darle al borde de corte tanto soporte como sea posible.

Otra diferencia es la forma en que se coloca el ángulo de corte de la herramienta en posición. Las formas alternativas para sostener y presentar el filo de corte de una herramienta de punta sencilla se ilustra en la fig. 24. La geometría de una herramienta de acero rápido se talla sobre un vástago sólido como se muestra en la parte (a) de la figura. El costo más alto, las diferencias en las propiedades y los procesamientos de los materiales más duros para herramienta han dado lugar al uso de insertos soldados o adheridos mecánicamente a un portaherramientas. La parte (b) muestra un inserto de carburo cementado soldado a un vástago de herramienta.

El vástago está hecho de acero de herramienta para proveer resistencia y tenacidad. La parte (c) ilustra un posible diseño para sostener mecánicamente un inserto en un portaherramientas. Se usa la sujeción mecánica para carburos cementados, cerámicas y otros materiales duros. La ventaja significativa del inserto fijado mecánicamente es que cada inserto contiene múltiples bordes o filos cortantes. Cuando un borde se desgasta, se afloja el inserto, se le da vuelta al siguiente borde y se fija nuevamente en el portaherramientas. Cuando todos los filos se han gastado, se reemplaza el inserto. Hay insertos disponibles en varias formas, incluyendo la cuadrada que se muestra en la fig. 24 (c), triangular, redonda y de otras formas. En la fig.25 se ilustra una colección de diferentes herramientas de corte.

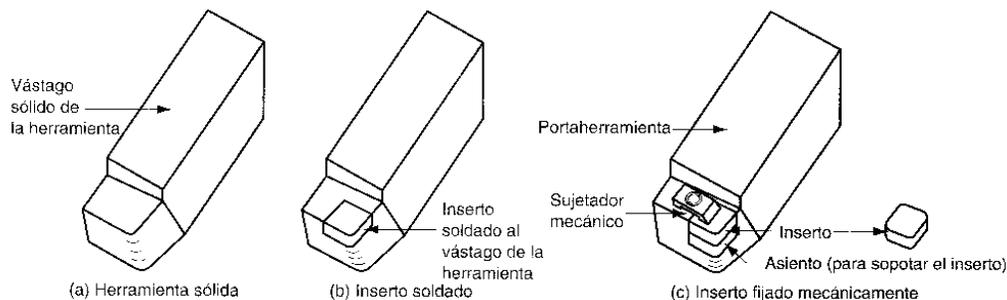


FIGURA 24 Tres formas para sostener y presentar el borde de corte de una herramienta de punta sencilla: (a) herramienta sólida, típica de los HSS; (b) inserto soldado, una forma de sostener un inserto de carburo cementado; y (c) inserto fijo mecánicamente, usado para carburos cementados, cerámicas y otros materiales muy duros.

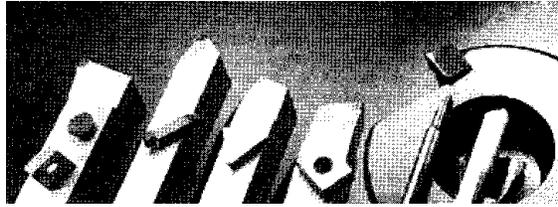


FIGURA 25. En esta fotografía se muestran varias formas de herramienta; las herramientas de corte están hechas de diamante sintético y nitruro de boro cúbico.

6.4. FLUIDOS PARA CORTE

Un *fluido para corte* es un líquido o gas que se aplica directamente a la operación de maquinado para mejorar el desempeño del corte. Los dos problemas principales que atienden los fluidos para corte son:

- 1) la generación de calor en las zonas de corte y fricción y
- 2) fricción en las internases herramienta-viruta y herramienta-trabajo.

Además de la remoción del calor y la reducción de la fricción, los fluidos para corte brindan beneficios adicionales como: remover las virutas (especialmente en esmerilado), reducir la temperatura de la parte de trabajo para un manejo más fácil, disminuir las fuerzas de corte y los requerimientos de potencia, mejorar la estabilidad dimensional de la parte de trabajo y optimizar el acabado superficial.

6.4.1. Tipos de fluidos para corte

Se dispone de varios fluidos para corte comerciales. Es conveniente analizarlos atendiendo primero a su función, para después clasificarlos por su composición química.

Funciones de los fluidos para corte. De acuerdo con la generación de calor y fricción hay dos categorías generales de fluidos para corte:

- 1) refrigerantes, y
- 2) lubricantes.

Los *refrigerantes* son fluidos para corte diseñados para reducir los efectos del calor en las operaciones de maquinado. Tienen efecto limitado sobre la magnitud de energía calorífica generada durante el corte; pero extraen el calor que se genera, de esta manera se reduce la temperatura de la herramienta y de la pieza de trabajo, y ayuda a prolongar la vida de la herramienta de corte. La capacidad que tiene un fluido para corte de reducir la temperatura del maquinado depende de sus propiedades térmicas. El calor específico y la conductividad térmica son las propiedades más importantes.

El agua tiene un calor específico y una conductividad térmica mayores, con respecto a otros líquidos, por esta razón se utiliza como base de los fluidos para corte del tipo refrigerante. Estas propiedades le permiten al refrigerante extraer el calor de la operación, reduciendo así la temperatura de la herramienta de corte. Los fluidos para corte tipo refrigerante parecen ser más efectivos a velocidades de corte relativamente altas, donde la generación del calor y las altas temperaturas son un problema.

Son más efectivos en los materiales susceptibles a las fallas por temperatura, como los aceros rápidos, y se usan frecuentemente en operaciones de torneado y fresado donde se genera calor en grandes cantidades. Por lo general, los refrigerantes son soluciones o emulsiones en agua debido a que ésta tiene propiedades térmicas ideales para estos fluidos para corte.

Los lubricantes son fluidos basados generalmente en aceite (por sus buenas propiedades lubricantes), formulados para reducir la fricción en las interfases herramienta-viruta y herramienta-trabajo. Los fluidos lubricantes de corte operan por *lubricación de presión extrema*, una forma especial de lubricación en el límite que involucro la formación de una capa delgada de sales sólidas sobre la superficie caliente y limpia del metal a través de reacciones químicas con el lubricante. Los compuestos de azufre, cloro y fósforo del lubricante causan la formación de estas capas superficiales, que actúan para separar las dos superficies metálicas (de la viruta y de la herramienta). Las películas de presión extrema son más efectivas para reducir la fricción en el corte de metales que en la lubricación convencional de límites.

Los fluidos para procesos de corte tipo lubricante son más efectivos a velocidades bajas de corte; tienden a perder su efectividad a altas velocidades, arriba de 120 m/min., debido a que el movimiento de la viruta a estas velocidades previene que el fluido para corte alcance la internase herramienta-viruta. Además de las altas temperaturas de corte que generan estas velocidades, los aceites se vaporizan antes de que puedan lubricar. Las operaciones de maquinado como el agujereado y el roscado se benefician por lo general de los lubricantes. En estas operaciones se retarda la formación de acumulados en el filo de corte y se reduce el momento de torsión de la herramienta.

Aunque el propósito principal de un lubricante es reducir la fricción, también reduce la temperatura a través de varios mecanismos.

En primer lugar, el calor específico y la conductividad térmica del lubricante ayudan a remover el calor de la operación, reduciendo por lo tanto la temperatura.

En segundo lugar, debido a que se reduce la fricción, también se reduce el calor generado como resultado de la fricción.

En tercer lugar, un coeficiente más bajo de fricción se traduce en un menor ángulo de fricción. De acuerdo con la ecuación de Merchant, un menor ángulo de fricción ocasiona un aumento del ángulo del plano cortante, por consiguiente, la magnitud de la energía calorífica generada en la zona de corte se reduce.

Hay un efecto típico de solapado entre los tipos de fluidos para corte. Los refrigerantes se formulan con ingredientes que ayudan a reducir la fricción. Y los lubricantes tienen propiedades térmicas, que aunque no son tan buenas como las del agua, actúan para remover el calor de la operación de corte. Los fluidos para corte (refrigerantes y lubricantes) ponen de manifiesto su efecto en la ecuación de Taylor para la vida de la herramienta a través de valores más altos de C . Son típicos los incrementos del 10 al 40%. La pendiente n no se afecta significativamente.

Formulación química de los fluidos para corte. Hay tres categorías básicas de fluidos para corte de acuerdo con su formulación química:

- 1) aceites de corte,
- 2) aceites emulsionados y
- 3) fluidos químicos y semiquímicos.

Las características de las tres categorías y de sus aplicaciones se resumen en el esquema de la fig.26.

Los aceites de corte son fluidos basados en aceites derivados del petróleo, de origen animal, marino o vegetal. Los aceites minerales son los principales debido a su abundancia y sus características favorables en general. Para lograr la máxima capacidad de lubricación se combinan frecuentemente todos los tipos de aceite en un mismo líquido. También se mezclan aditivos químicos para incrementar las cualidades lubricantes.

Estos aditivos contienen compuestos de azufre, cloro o fósforo y se diseñan para reaccionar químicamente con las superficies de la herramienta y de la viruta para formar películas sólidas (lubricación por presión extrema), que ayudan a evitar el contacto entre metal y metal.

Los *aceites emulsionados* son fluidos que forman suspensiones de pequeñas gotas de aceite en agua. El fluido se hace mezclando aceite (mineral por lo general) en agua, y se utiliza un agente emulsionante para promover la mezcla y la estabilidad de la emulsión. Una relación típica entre agua y aceite es de 30:1. Se usan frecuentemente aditivos químicos basados en azufre, cloro y fósforo para promover la lubricación a presión extrema. Debido a que contienen aceite y agua, los aceites emulsionantes combinan las cualidades de lubricación y refrigeración en un solo fluido para corte.

Los *fluidos químicos* son sustancias químicas disueltas en agua, más que aceites emulsionados en agua. Las sustancias químicas disueltas son compuestos de azufre, cloro o fósforo y agentes humectantes. Las sustancias químicas se destinan a suministrar algún grado de lubricación a la solución. Los fluidos químicos tienen buenas propiedades refrigerantes, pero sus cualidades lubricantes son menores que las de los otros tipos de fluidos.

Los *fluidos semiquímicos* son fluidos químicos que contienen pequeñas cantidades de aceite emulsionado para incrementar las características lubricantes del fluido de corte. De hecho es una clase híbrida entre fluidos químicos y aceites emulsionantes.

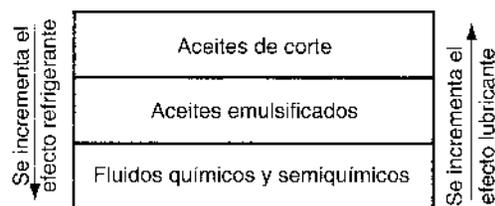


FIGURA 26. Tres formulaciones químicas básicas de fluidos para corte y su aplicación característica.

6.4.2. Aplicación de los fluidos para corte

Los fluidos para corte se aplican a las operaciones de maquinado en varias formas. En esta sección consideraremos sus técnicas de aplicación, el problema de la contaminación de los fluidos, y también la forma como se utiliza la filtración para mantener los fluidos.

Métodos de aplicación. El método más común es la *inundación*, llamada algunas veces enfriamiento por inundación, debido a que se usa generalmente con fluidos de enfriamiento. En este método se dirige una corriente constante de fluido hacia la interfase herramienta-trabajo o herramienta-viruta de la operación de maquinado.

Un segundo método consiste en la *aplicación de niebla*, usada principalmente para fluidos para corte basados en agua. En este método se dirige el fluido hacia la operación en forma de niebla acarreada por una corriente de aire presurizado. La aplicación de niebla no es generalmente tan efectiva como la inundación de la herramienta de corte. Sin embargo, debido a la alta velocidad de la corriente de aire, la aplicación de niebla puede ser más efectiva para llevar el fluido de corte a áreas inaccesibles que no pueden ser alcanzadas por la inundación convencional.

Se usa la *aplicación manual* del fluido de corte por medio de una aceitera o brocha para aplicar lubricantes en operaciones de roscado, y otras donde las velocidades de corte son bajas y la fricción es un problema. La mayoría de los talleres de maquinado en producción prefieren generalmente no usar esta técnica debido a la variabilidad de su aplicación.

Filtración de los fluidos para corte. Los fluidos para corte se contaminan al cabo del tiempo con una variedad de sustancias extrañas. Estos contaminantes incluyen aceites sucios (aceite de máquina, fluidos hidráulicos, etc.), basura, pequeñas virutas, hongos y bacterias. Además de causar malos olores y riesgos a la salud, los fluidos para corte contaminados no desempeñan sus funciones tan bien como cuando están frescos y limpios.

Algunas alternativas para manejar este problema son las siguientes:

- 1) reemplazar el fluido para corte a intervalos regulares y frecuentes (quizá dos veces por mes),
- 2) realizar el maquinado sin fluidos para corte, o
- 3) usar un sistema de filtración continua para limpiar el fluido.

Debido al crecimiento de la conciencia ambiental y a la legislación asociada con la contaminación, la eliminación de los fluidos gastados se ha vuelto costosa y contraria al bienestar público general. El maquinado sin fluidos para corte ahorra los costos de su eliminación, pero estos ahorros se neutralizan por los costos de producción más altos.

Se han instalado sistemas de filtración en numerosos talleres de máquinas para resolver los problemas de contaminación. Las ventajas de estos sistemas incluyen:

- 1) prolongación de la vida de los fluidos entre cambios (en lugar de reemplazar el fluido una o dos veces por mes, se han reportado vidas de refrigerantes de hasta un año);
- 2) se reducen los costos de eliminación de los fluidos ya que ésta es mucho menos frecuente cuando se usan filtros;
- 3) fluidos para corte más limpios para un mejor ambiente de trabajo y reducción de los riesgos contra la salud;
- 4) menor mantenimiento de las máquinas herramienta y
- 5) una vida más larga de las herramientas.

Hay varios tipos de sistemas para filtrar los fluidos para corte.

7. OPERACIONES DE MAQUINADO Y MAQUINAS HERRAMIENTA

Este capítulo describe la importancia de las operaciones de maquinado y de las máquinas herramienta que se usan para llevar a cabo estos procesos.

Se examinarán también algunos de los aspectos de ingeniería en la aplicación del maquinado, que incluyen la creación de las formas de las partes de trabajo, las tolerancias, los acabados superficiales, la maquinabilidad y la selección de las condiciones de corte (avances y velocidades).

7.1. TORNEADO Y OPERACIONES AFINES

El torneado es un proceso de maquinado en el cual una herramienta de punta sencilla remueve material de la superficie de una pieza de trabajo cilíndrica en rotación. La herramienta avanza linealmente y en una dirección paralela al eje de rotación, como se ilustra en la fig. 27.

El torneado se lleva a cabo tradicionalmente en una máquina herramienta llamada *torno*, la cual suministra la potencia para tornear la parte a una velocidad de rotación determinada con avance de la herramienta y profundidad de corte especificados.

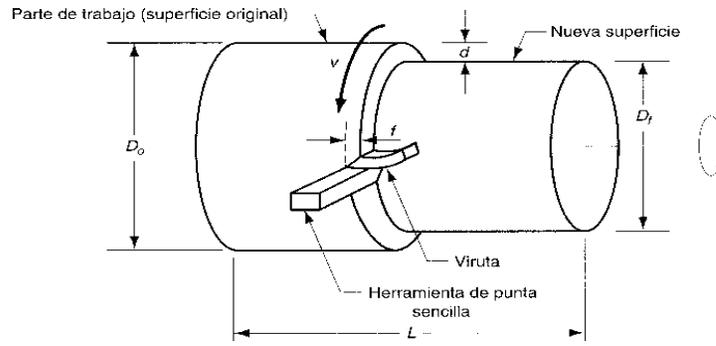


FIGURA 27. Operación de torneado.

7.1.1. Condiciones de corte en el torneado

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación

$$N = v / \pi \cdot D_o \quad (1)$$

donde N = velocidad de rotación, en rev/min.; v velocidad de corte, en m/min; y D_o = diámetro original de la parte, en m. La operación de torneado reduce el diámetro del trabajo D_o al diámetro final D_f . El cambio de diámetro se determina por la profundidad de corte d :

$$D_o - D_f = 2d \quad (2)$$

El avance en el torneado se expresa generalmente en mm/rev.. Este avance se puede convertir a velocidad de avance lineal en mm/min. mediante la fórmula:

$$f_r = N \cdot f \quad (3)$$

donde f_r = velocidad de avance, mm/min y f = avance, mm/rev. El tiempo para maquinarse una parte de trabajo cilíndrica de un extremo al otro está dado por:

$$T_m = \frac{L}{f_r} \quad (4)$$

donde T_m = tiempo de maquinado real en min. y L = longitud de la parte cilíndrica en mm. Generalmente se añade una pequeña distancia a la longitud al principio y al final de la pieza de trabajo para dar margen a la aproximación y al sobre recorrido de la herramienta.

La velocidad volumétrica de remoción del material se puede determinar más convenientemente por la siguiente ecuación.

$$MRR = v \cdot f \cdot d \quad (5)$$

donde MRR = velocidad de remoción de material, mm^3/min .. En esta ecuación las unidades de f se expresan simplemente como mm, ignorando el efecto de la rotación del torneado. Debe asegurarse que las unidades para la velocidad sean consistentes con las de f y d .

7.1.2. Operaciones relacionadas con el torneado

Además del torneado, se puede realizar una gran variedad de operaciones de maquinado en un tomo. En la fig. 28 se ilustran las siguientes:

- a) *Careado*. La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.
- b) *Torneado ahusado o cónico*. En lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación del trabajo, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica.
- c) *Torneado de contornos*. En lugar de que la herramienta avance a lo largo de una línea recta paralela al eje de rotación como en torneado, sigue un contorno diferente a la línea recta, creando así una forma contorneada en la parte torneada.
- d) *Torneado de formas*. En esta operación llamada algunas veces formado, la herramienta tiene una forma que se imparte al trabajo y se hunde radialmente dentro del trabajo.
- e) *Achaflanado*. El borde cortante de la herramienta se usa para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y forma lo que se llama un "chaflán".
- f) *Tronzado*. La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, en algún punto a lo largo de su longitud, para tronzar el extremo de la parte. A esta operación se le llama algunas veces *partido*.
- g) *Roscado*. Una herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la parte de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro.
- h) *Perforado*. Una herramienta de punta sencilla avanza en línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la parte.
- i) *Agujereado*. El agujereado se puede ejecutar en un tomo, haciendo avanzar la broca dentro del trabajo rotatorio a lo largo de su eje. El *escariado* se puede realizar en forma similar.
- j) *Moleteado*. Ésta no es una operación de maquinado porque no involucro corte de material. Es una operación de formado de metal que se usa para producir un rayado regular o un patrón en la superficie de trabajo.

Las herramientas de punta sencilla se usan en la mayoría de las operaciones ejecutadas en tornos. Las herramientas de corte para el torneado, careado, ahusado, contorneado, chaflanado y perforado son herramientas de punta sencilla. Una operación de roscado se ejecuta usando una herramienta de punta sencilla, diseñada con la forma de la cuerda a producir. Ciertas operaciones requieren herramientas diferentes a las de punta sencilla. El torneado de formas se ejecuta con una de diseño especial llamada herramienta de forma. El perfil de la forma tallada en la herramienta establece la forma de la parte de trabajo. Una herramienta de tronzado es básicamente una herramienta de forma. El agujereado se realiza mediante una broca. El moleteado se ejecuta con una herramienta de moleteado que consiste en dos rodillos formadores endurecidos y montados sobre sus centros. Los rodillos formadores tienen el patrón de moleteado deseado en sus superficies. Para ejecutar el moleteado, se presiona la herramienta contra la superficie de la parte rotatorio con la presión suficiente para imprimir el patrón sobre la superficie del trabajo.

7.1.3. El torno mecánico

El tomo básico usado para torneado y operaciones afines es un *torno mecánico*. Es una máquina herramienta muy versátil que se opera en forma manual y se utiliza ampliamente en producción baja y media. El término "máquina" se originó en el tiempo en que estos mecanismos eran movidos por máquinas de vapor.

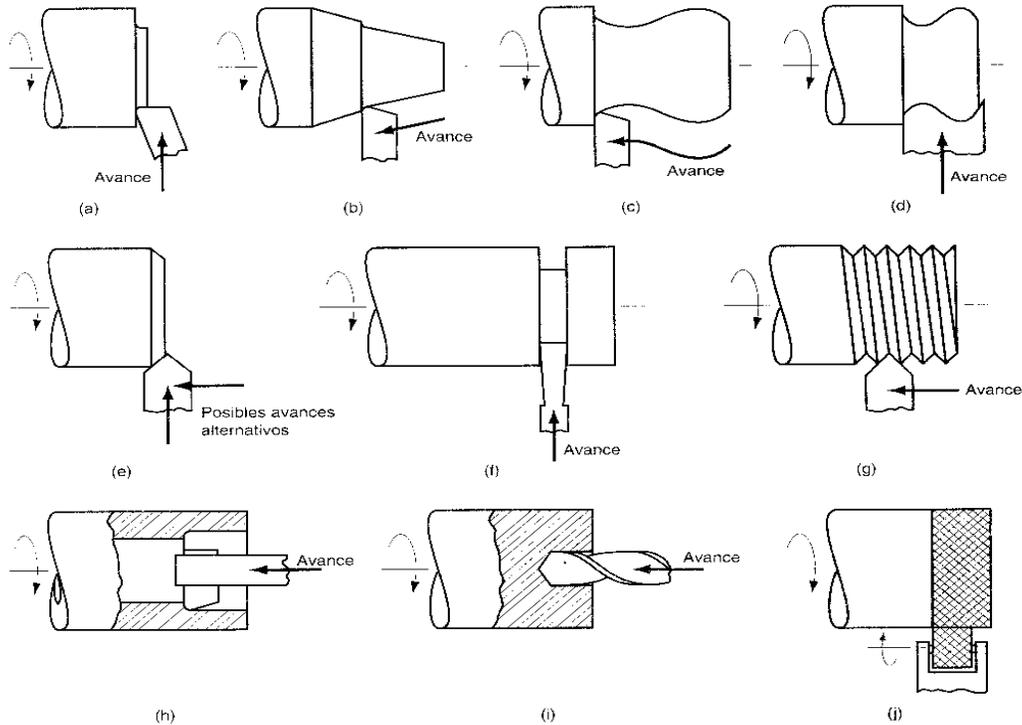


FIGURA 28. Otras operaciones diferentes al torneado que se realizan en un torno: (a) careado, (b) torneado ahusado, (c) torneado de contornos, (d) formado en torno, (e) achaflanado, (f) tronzado, (g) roscado, (h) perforado, (i) agujereado y (j) moleteado.

Tecnología del torno mecánico. La fig. 29 es un diagrama de un torno mecánico mostrando sus componentes principales. El *cabezal* contiene la unidad de transmisión que mueve el husillo que hace girar al trabajo. Opuesta al cabezal está el *contrapunto*, en el cual se monta un centro para sostener el otro extremo del trabajo. La herramienta de corte es sostenida por una *torreta* que se encuentra fija al *carro transversal*, que se ensambla al *carro principal*. El *carro principal* se diseña para deslizarse sobre las *guías* del torno a fin de hacer avanzar la herramienta paralelamente al eje de rotación. Las guías son una especie de rieles a lo largo de los cuales se mueve el carro y están hechas con gran precisión para lograr un alto grado de paralelismo con respecto al eje del husillo. Las guías se construyen sobre la *bancada* del torno que provee una armazón rígida para el torno mecánico. El carro se mueve por medio de un tornillo guía sin fin que gira a la velocidad propia para obtener la velocidad de avance deseada. El carro transversal está diseñado para avanzar en una dirección perpendicular al movimiento del carro. Por lo tanto, al mover el carro, la herramienta puede avanzar paralela al eje del trabajo para ejecutar el torneado recto. Y al mover el carro transversal, la herramienta puede avanzar radialmente dentro del trabajo para ejecutar el careado, el torneado de forma o la operación de tronzado.

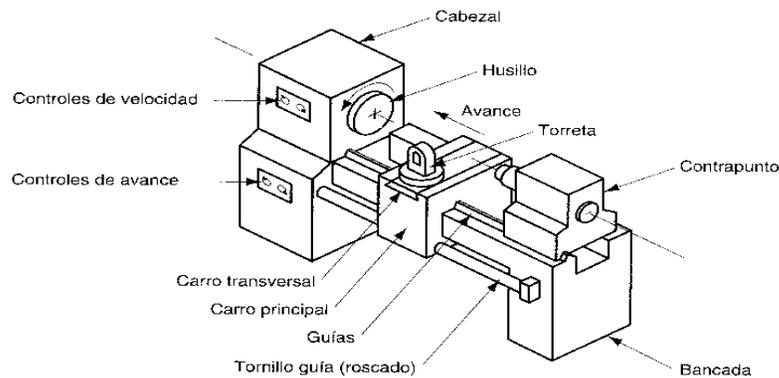


FIGURA 29. Diagrama de un torno mecánico, indicando sus componentes principales.

El tomo mecánico convencional y la mayoría de otras máquinas descritas en esta sección son *máquinas de torneado horizontal*; es decir, el eje del husillo es horizontal. Esto es adecuado para la mayoría de los trabajos de torno donde la longitud es mayor que el diámetro. Para trabajos donde el diámetro es mayor que la longitud y el trabajo es pesado, es más conveniente orientar el trabajo de manera que gire alrededor de un eje vertical; éstas son las *máquinas de torneado vertical*.

El tamaño del torno se designa por

- 1) el diámetro máximo admisible (el volteo) y
- 2) la máxima distancia entre los centros.

El *volteo* es el diámetro máximo de la parte de trabajo que puede girar en el husillo, se determina como el doble de la distancia que existe entre el eje central del husillo y las guías de la máquina. El máximo tamaño real de la parte de trabajo cilíndrica que puede acomodarse en el torno es algo más pequeña, debido a que el carro y la corredera lateral están sobre las guías. La *máxima distancia entre los centros* indica la longitud máxima de la pieza de trabajo que puede ser montada entre el cabezal y el contrapunto. Por ejemplo, un tomo de 350x1200 indica que el diámetro máximo admisible es de 350mm y la distancia máxima entre los centros es de 1200mm.

Métodos de sujeción del trabajo al torno. Se usan cuatro métodos comunes para sujetar las partes de trabajo en el torneado, que a su vez consisten en varios mecanismos para sujetar el trabajo, centrarlo y mantenerlo en posición sobre el eje del husillo y hacerlo girar. Los métodos se ilustran en la fig. 30 y son: (a) montura del trabajo entre los centros, (b) mandril, (e) boquilla y (d) plato de sujeción.

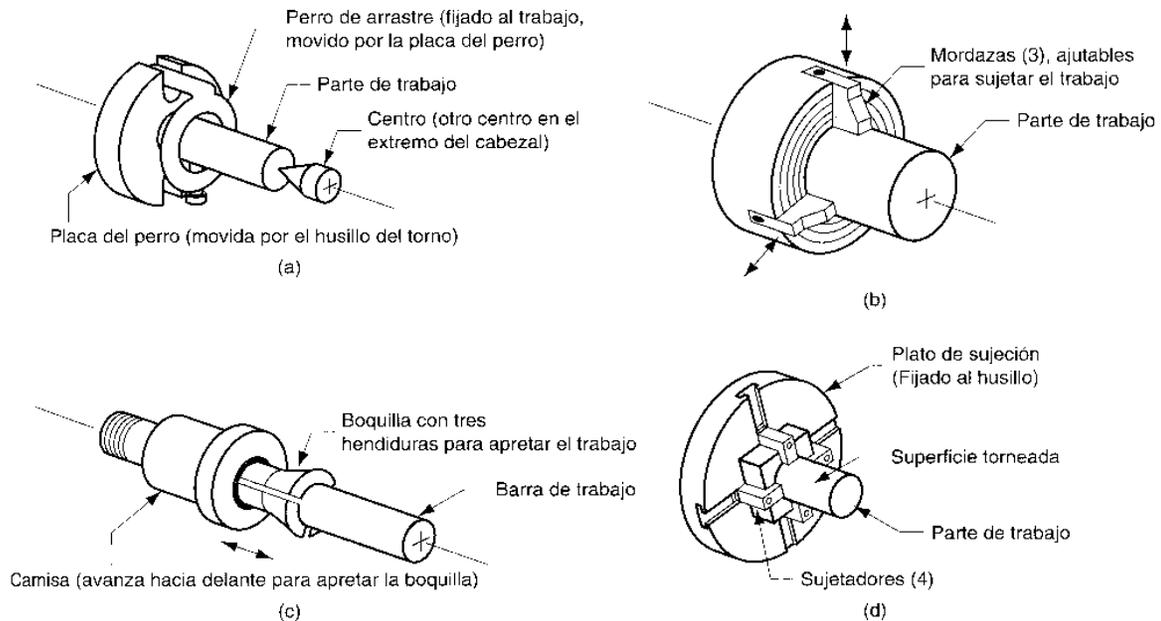


FIGURA 30. Cuatro métodos para sujetar el trabajo en un torno: (a) montaje del trabajo usando un perro, (b) mandril de tres mordazas, (c) boquilla y (d) plato de sujeción para partes de trabajo no cilíndricas.

La sujeción del trabajo *entre los centros* se refiere al uso de dos centros, uno en el cabezal y el otro en el contrapunto, como se muestra en la fig. 30(a). Este método es apropiado para partes que tienen una alta relación entre la longitud y el diámetro. En el centro del cabezal se fija una brida llamada *perro* o *plato* de arrastre, en la parte exterior del trabajo que se usa para transmitir la rotación del husillo. El centro del contrapunto tiene una punta en forma de cono que se inserta en un agujero practicado en el extremo del trabajo.

El centro del contrapunto puede ser un centro vivo o muerto. Un *centro vivo* gira en un rodamiento del contrapunto, de manera que no hay rotación relativa entre el trabajo y el centro vivo y por tanto no hay fricción. En contraste, un *centro muerto* está fijo en el contrapunto y no gira; la pieza de trabajo gira alrededor del punto. Debido a la fricción y a la acumulación del calor que resulta, esta disposición se usa normalmente a menores velocidades de rotación. El centro vivo se puede usar a altas velocidades.

El *mandril* (*chuck* en inglés), fig. 30(b), tiene varios diseños, con tres o cuatro mordazas para sostener la parte cilíndrica sobre su diámetro exterior. Las mordazas se diseñan frecuentemente para sostener también el diámetro interior de una parte tubular. Un *mandril autocentrante* tiene un mecanismo que mueve simultáneamente las mordazas hacia dentro o hacia fuera, y de esta forma centra el trabajo en el eje del husillo. Otros mandriles permiten la operación independiente de cada mordaza. Los mandriles se pueden usar con o sin el centro del contrapunto. Para partes con baja relación entre la longitud y el diámetro, la sujeción de la parte al mandril en forma empotrada (en voladizo) es por lo general suficiente para soportar las fuerzas de corte. Para barras largas de trabajo se necesita el soporte del contrapunto.

Una *boquilla* consiste en un buje tubular con hendiduras longitudinales que corren sobre la mitad de su longitud e igualmente espaciadas alrededor de su circunferencia, como se muestra en la fig. 30(c). El diámetro interior de la boquilla se usa para sostener trabajos de forma cilíndrica como barras. Debido a las hendiduras, un extremo de la boquilla puede apretarse para reducir su diámetro y suministrar una presión de agarre segura sobre el trabajo. Como hay un límite en la reducción que se puede obtener en una boquilla de cualquier diámetro dado, estos dispositivos de sujeción del trabajo se deben hacer en varias medidas para igualar el tamaño particular de la pieza de trabajo.

Un *plato de sujeción* fig. 30(d) es un dispositivo para sujetar el trabajo que se fija al husillo del torno y se usa para sostener partes con formas irregulares. Debido a su forma irregular, estas partes no se pueden sostener por otros métodos de sujeción. Por lo tanto, el plato está equipado con mordazas diseñadas a la medida de la forma particular de la parte.

7.1.4. Otros tornos y máquinas de tornear

Además de los tornos mecánicos, se han desarrollado otras máquinas de tornear para satisfacer funciones particulares o para automatizar el proceso de torneado. Entre estas máquinas están:

- 1) el tomo para herramientas,
- 2) el torno de velocidad,
- 3) el tomo revólver,
- 4) el tomo de mandril,
- 5) la máquina automática de tomillos y
- 6) el tomo controlado numéricamente.

Torno para herramientas y torno de velocidad. Estos dos tornos están estrechamente relacionados con el torno mecánico. El *torno para herramientas* es más pequeño y tiene más velocidades y avances disponibles. Se construye también para precisiones más altas en concordancia con su propósito de fabricar componentes para herramientas, accesorios y otros dispositivos de alta precisión.

El *torno de velocidad* es más simple en su construcción que el tomo mecánico. No tiene carro ni cursor transversal ni tampoco tornillo guía para manejar el carro. El operador sostiene la herramienta de corte usando un sostén fijo en la bancada del torno. Las velocidades son más altas en el torno de velocidad, pero el número de velocidades es limitado. Las aplicaciones de este tipo de máquina incluyen el torneado de madera, el repujado de metal y operaciones de pulido.

Torno revólver. Un torno revólver es un torno operado manualmente en el cual el contrapunto se ha reemplazado por una torreta que sostiene hasta seis herramientas de corte. Estas herramientas se pueden poner rápidamente en acción frente al trabajo, una por una, girando la torreta. Además, el poste convencional de herramientas que se usa en el tomo mecánico está reemplazado por una torreta de cuatro lados, que es capaz de poner cuatro herramientas en posición. Dada la capacidad de cambios rápidos de herramientas, el torno revólver se usa para trabajos de alta producción que requieren una secuencia de cortes sobre la parte.

Torno de mandril. Como su nombre lo indica, este tomo usa un *mandril* en el husillo para sostener la parte de trabajo. El contrapunto está ausente en esta máquina, de manera que las partes no se pueden montar entre los centros. Esto restringe el uso de un tomo de mandril a partes cortas y ligeras. La disposición de la operación es similar al torno revólver, excepto que las acciones de avance de las herramientas de corte se controlan más en forma automática que mediante un operador la función del operador es cargar y descargar las partes.

Máquina de barra automática. Una *máquina de barra* es similar al tomo de mandril, excepto que se usa una boquilla en lugar de un mandril, la cual permite alimentar barras largas a través del cabezal en posición de trabajo. Al final de cada ciclo de maquinado, una operación de corte retira la parte torneada. La barra se corre entonces hacia adelante para presentar nuevo material para la próxima parte. El avance del material, así como los corrimientos y los avances de las herramientas de corte se realizan automáticamente. Debido al alto nivel de operación automática, frecuentemente se le da a esta máquina el nombre de *máquina de barras automática*. Una aplicación importante para este tipo de máquinas es la producción de tornillos y partes similares de artículos de ferretería. A menudo se usa el término *máquina de tornillos automática* para las máquinas que se usan en estas aplicaciones.

Las máquinas de barras pueden clasificarse como de husillo simple y de husillo múltiple. Una *máquina de barras de husillo simple* tiene un husillo que permite usar solamente una herramienta de corte a la vez por cada parte que se maquina. Por lo tanto, mientras cada herramienta corta el trabajo las otras herramientas están ociosas (los tornos revólver y los tornos de mandril están también limitadas por esta operación secuencias no simultánea). Para incrementar la utilización de las herramientas de corte y la velocidad de producción existen las *máquinas de barras de husillo múltiple*. Estas máquinas tienen más de un husillo, de manera que muchas partes se pueden maquinar simultáneamente por muchas herramientas. Por ejemplo, una máquina de barras automática de seis husillos puede cortar seis partes al mismo tiempo, como se muestra en la fig. 31.

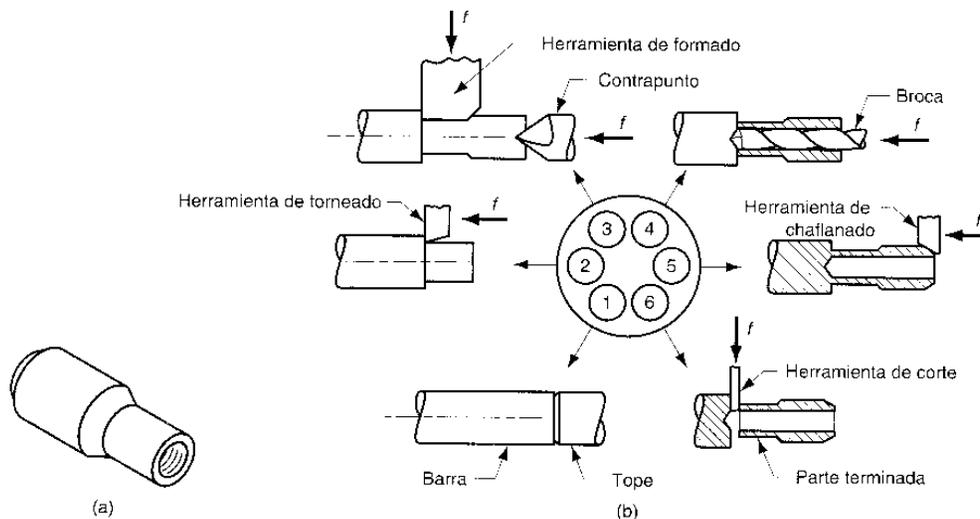


FIGURA 31 (a) Tipo de pieza producida en una máquina de barras automática de seis husillos y (b) secuencia de operaciones para producir la pieza: (1) avance del material hasta el tope, (2) torneado del diámetro principal, (3) formado del segundo diámetro y centrado, (4) agujereado, (5) achaflanado, y (6) tronzado.

Al final de cada ciclo de maquinado, los husillos (incluyendo las boquillas y las barras de trabajo) se corren al siguiente juego de herramientas de corte. O sea que, cada pieza debe ser cortada en forma secuencial por seis juegos de herramientas de corte que toman seis ciclos de maquinado, pero cada pieza se completa al final de cada ciclo. Como resultado, una máquina automática de tornillos con seis husillos tiene la velocidad más alta de producción que cualquier máquina de torneado.

Tornos controlados numéricamente: La secuenciación y la actuación de los movimientos en las máquinas de tornillos y de mandril se han controlado tradicionalmente por medio de plantillas y otros dispositivos mecánicos. La forma moderna es el control numérico computarizado CNC.

El CNC es un medio sofisticado y muy versátil para controlar los dispositivos mecánicos, que ha conducido al desarrollo de máquinas herramienta capaces de ciclos de maquinado y formas geométricas más complejas y a niveles más altos de operación automática que las máquinas de tornillos convencionales y las máquinas de mandril.

El torno de CNC es un ejemplo de estas máquinas de torneado, y es especialmente útil para operaciones de torneado en contorno con tolerancias de trabajo estrechas. En la actualidad, casi todas las máquinas de barras y tornos de mandril están equipadas con un control numérico computarizado.

7.1.5. Máquinas perforadoras

El perforado es similar al torneado. Usa una herramienta de punta sencilla contra una pieza de trabajo en rotación. La diferencia es que el perforado se realiza en el diámetro interior de un agujero existente, en lugar del diámetro exterior de un cilindro existente. En efecto, el perforado es una operación de torneado interno.

Las máquinas herramienta usadas para realizar las operaciones de perforado se llaman *máquinas perforadoras (también molinos perforadores)*. Se podría esperar que las máquinas perforadoras tuvieran características comunes con las máquinas de torneado; ciertamente, como se indicó antes, los tornos se usan algunas veces para realizar el perforado. Las máquinas perforadoras pueden ser horizontales o verticales. La designación se refiere a la orientación del eje de rotación del husillo de la máquina o de la pieza de trabajo. En una operación de *perforado horizontal*, la disposición se puede arreglar en cualquiera de dos formas.

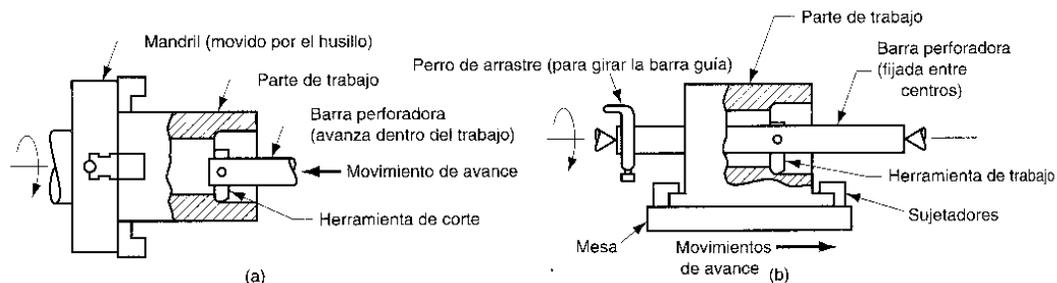


FIGURA 32 Dos formas de perforado horizontal: (a) una barra perforadora avanza dentro de una pieza de trabajo rotatoria y (b) el trabajo avanza frente a una barra perforadora rotatoria.

En la primera, el trabajo se fija a un husillo giratorio y la herramienta a una barra volada que la hace avanzar dentro del trabajo, como se ilustra en la fig. 32(a). La máquina que perfora en esta disposición debe ser muy rígida para evitar la deflexión y la vibración durante el corte. Para lograr alta rigidez, las barras perforadoras se hacen frecuentemente de carburo cementado, cuyo módulo de elasticidad se aproxima a 620×10^3 MPa. La fig. 33 muestra una barra perforadora de carburo.

En la segunda disposición posible la herramienta se monta a una barra perforadora, la cual se soporta y gira entre los centros. El trabajo se sujeta a un mecanismo de alimentación que lo pasa frente a la herramienta. Esta disposición [figura 32(b)] se puede usar para realizar una operación de perforado en un tomo convencional.

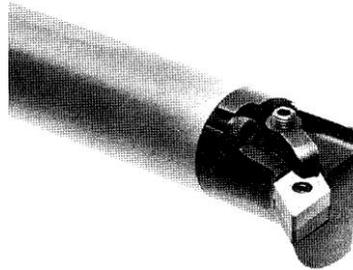


FIGURA 33 Barra perforadora hecha de carburo cementado (WC-Co) que usa insertos intercambiables de carburo cementado.

Una *máquina de perforado vertical* se usa para piezas pesadas de trabajo con diámetros grandes, por lo general el diámetro de la pieza de trabajo es más grande que su longitud. Como se muestra en la fig. 34, la pieza se monta en una mesa de trabajo que gira con respecto a la base de la máquina. Hay mesas de trabajo hasta de 1,2 m de diámetro.

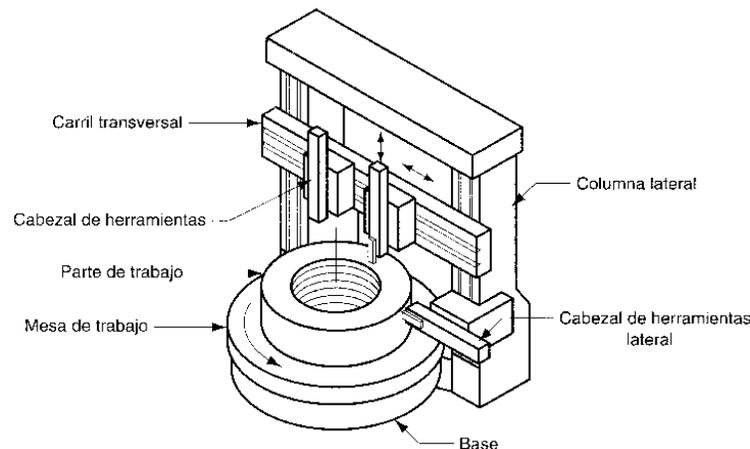


FIGURA 34 Máquina perforadora vertical.

La máquina perforadora típica puede poner en posición y hacer avanzar varias herramientas de corte simultáneamente. Las herramientas se montan en cabezales de herramientas que pueden avanzar horizontal y verticalmente con respecto a la mesa de trabajo. Uno o dos cabezales se montan en una guía horizontal, se ensamblan en el bastidor de herramientas de la máquina por encima de la mesa de trabajo. Las herramientas de corte montadas por encima del trabajo se pueden usar para carear y perforar. Además de las herramientas sobre la guía, se pueden montar uno o dos cabezales adicionales en las columnas laterales del bastidor para permitir el torneado en el diámetro exterior del trabajo.

Las cabezas portaherramientas usadas en una máquina de perforado vertical incluyen frecuentemente torretas para acomodar varias herramientas de corte. Esto hace difícil distinguir entre esta máquina y un tomo revólver vertical. Algunos constructores de máquinas herramienta especifican que los tomos revólver verticales se usan para diámetros de trabajo de hasta 2,5 m, mientras que las máquinas perforadoras verticales se usan para diámetros más grandes. Las máquinas perforadoras verticales también se aplican frecuentemente a trabajos especializados, mientras que los tomos revólver verticales se usan para la producción por lotes.

7.2. AGUJEREADO Y OPERACIONES AFINES

El agujereado [fig..2 (b)] es una operación de maquinado que se usa para crear agujeros redondos en una pieza de trabajo. Esto contrasta con el perforado descrito previamente, el cual solamente puede usarse para agrandar un agujero existente.

El agujereado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, llamada *broca*, que tiene dos bordes cortantes en su extremo. La broca avanza dentro de la pieza de trabajo estacionaria para formar un agujero cuyo diámetro está determinado por el diámetro de la broca. El agujereado se realiza en un *perforadora*, aunque otras máquinas herramienta puedan ejecutar esta operación.

7.2.1. Agujereado con brocas helicoidales

Hay disponibles varias herramientas de corte para hacer agujeros, pero la broca helicoidal es la más común. Sus diámetros fluctúan desde 0,15 mm hasta brocas de 75 mm. Las brocas helicoidales se usan ampliamente en la industria para producir agujeros en forma rápida y económica. La geometría estándar de la broca helicoidal se ilustra en la fig. 35.

El cuerpo de la broca tiene dos *ranuras o canales* helicoidales (de la hélice deriva el nombre de broca helicoidal). El ángulo de las ranuras helicoidales se llama ángulo de la hélice, un valor típico tiene alrededor de 30°. Durante la operación, las ranuras actúan como canales de extracción de la viruta del agujero. Aunque es deseable que la abertura de las ranuras sea grande para proveer el claro máximo de la viruta, el cuerpo de la broca debe ser soportado sobre su longitud. Este soporte lo provee el alma o núcleo, que es el espesor de la broca entre las ranuras.

La punta de la broca tiene la forma general de un cono. Un valor típico para el *ángulo de la punta* es de 118°. La punta se puede diseñar en varias formas, pero el diseño más común es el *borde de cincel*, como se muestra en la figura. Conectadas con el filo del cincel hay dos bordes cortantes (algunas veces llamados labios) que conducen hacia las ranuras. La porción de cada ranura adyacente al borde cortante actúa como la cara inclinada de la herramienta.

La acción de corte de la broca helicoidal es compleja. La rotación y el avance de la broca producen un movimiento relativo entre los filos cortantes y la pieza de trabajo que forma la viruta. La velocidad de corte en cada filo cortante varía en función de la distancia al eje de rotación. Por consiguiente, la eficiencia de la acción de corte varía, y es más eficiente en el diámetro exterior de la broca que en el centro.

De hecho, la velocidad relativa en la punta de la broca es cero, por lo tanto no hay corte. En su lugar, el borde de cincel de la punta de la broca empuja el material del centro hacia los lados cuando penetra dentro del agujero; se requiere una gran fuerza de empuje para conducir la broca helicoidal hacia el agujero. Al principio de la operación, el borde de cincel rotatorio tiende a deslizarse sobre la superficie de la pieza de trabajo y causa la pérdida de precisión posicional. Para resolver este problema se han desarrollado nuevos diseños de puntas.

La remoción de la viruta puede ser un problema en la operación de agujereado. La acción de corte tiene lugar dentro del agujero, y las ranuras deben proveer el claro suficiente a lo largo de la longitud de la broca para permitir que salga la rebaba del agujero. Al formarse la viruta, se mueve a través de las ranuras hacia la superficie del trabajo. La fricción complica la operación en dos formas. Además de la fricción usual en el corte de metales entre la viruta y la cara inclinada del borde cortante, también hay fricción por el roce entre el diámetro exterior de la broca y el agujero recientemente formado. Esto genera calor que eleva la temperatura de la broca y del trabajo.

La adición de un fluido de corte a la punta del taladro para reducir la fricción y el calor se dificulta debido a que la viruta fluye en dirección opuesta. Debido a la remoción de viruta y al calor, la profundidad del agujero que puede hacer una broca está limitada normalmente a no más de cuatro veces el diámetro.

Algunas brocas helicoidales tienen conductos internos longitudinales, a través de los cuales se puede bombear un fluido dentro del agujero cerca de la punta de la broca. Una aproximación alternativa con las brocas helicoidales que no tienen conductos para el fluido es el uso de un procedimiento de "picoteo" durante la operación de agujereado. En este procedimiento la broca sale periódicamente del agujero para limpiar la viruta antes de volver a entrar.

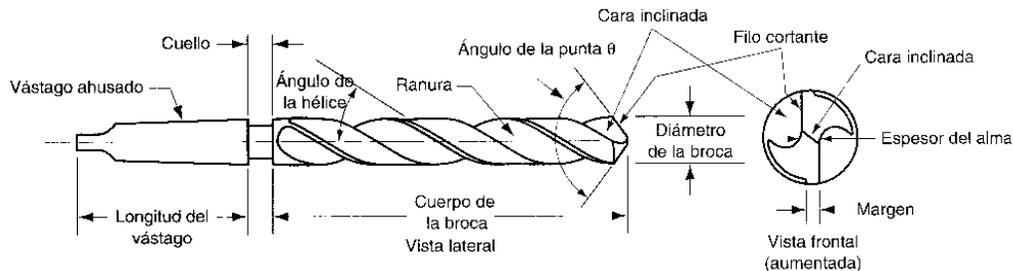


FIGURA 35. Geometría estándar de una broca helicoidal.

Las brocas se hacen normalmente de acero de alta velocidad. Su geometría se fabrica antes del tratamiento térmico y el exterior (bordes de corte y superficies de fricción) se endurece, mientras retiene un núcleo interno relativamente tenaz. El esmerilado se usa para afilar los filos de corte y la forma de la punta.

7.2.2. Condiciones de corte en el agujereado

La velocidad de corte en una operación de agujereado es la velocidad superficial en el diámetro exterior de la broca. Se especifica de esta forma por conveniencia, aunque casi todo el corte se realiza realmente a las velocidades más bajas cercanas al eje de rotación.

Para fijar la velocidad deseada de corte en agujereado es necesario determinar la velocidad de rotación de la broca por su diámetro. Si N representa las rev/min del husillo, entonces:

$$N = \frac{v}{\pi D} \quad (6)$$

donde v = velocidad tangencial de corte mm/min. ; y D = diámetro de la broca, mm. En algunas operaciones de agujereado, la superficie de la pieza gira sobre una herramienta en reposo, pero se aplica la misma fórmula.

En el agujereado, el avance f se especifica en mm/rev. Las velocidades recomendadas son aproximadamente proporcionales al diámetro del taladro; los avances más altos se logran con brocas de diámetro grande. Como generalmente existen dos bordes de corte en la punta de la broca, el espesor de la viruta no cortada (carga de viruta) que se toma en cada borde de corte es la mitad del avance. El avance puede convertirse a velocidad de avance si utilizamos la misma ecuación que en el torneado:

$$fr = N.f \quad (7)$$

donde fr = velocidad de avance, mm/min. Los agujeros agujereados pueden ser agujeros completos o agujeros ciegos (fig. 36). En los agujeros completos, la broca sale en el lado opuesto del trabajo; en los agujeros ciegos no es así.

El tiempo de maquinado requerido para perforar un agujero completo se puede determinar con la siguiente fórmula:

$$T_m = \frac{t + A}{f_r} \quad (8)$$

donde T_m = tiempo de maquinado (agujereado), min.; t = espesor del trabajo, mm; f_r = velocidad de avance, mm/min.; A = tolerancia de aproximación que tiene en cuenta el ángulo de la punta de la broca, y representa la distancia que la broca debe avanzar dentro del trabajo antes de alcanzar el diámetro completo [fig. 36(a)]. Dicha tolerancia está determinada por:

$$A = 0,5D \tan (90 - \theta / 2) \quad (9)$$

donde A = tolerancia de aproximación, mm; θ = ángulo de la punta de la broca.

En un agujero ciego la profundidad d se define como la distancia entre la superficie de trabajo y el punto más profundo del agujero [fig. 36(b)]. Por esta definición, el ángulo de tolerancia de la punta de la broca no afecta el tiempo para perforar el agujero. Entonces, el tiempo de maquinado para un agujero ciego está dado por:

$$T_m = \frac{d}{f_r} \quad (10)$$

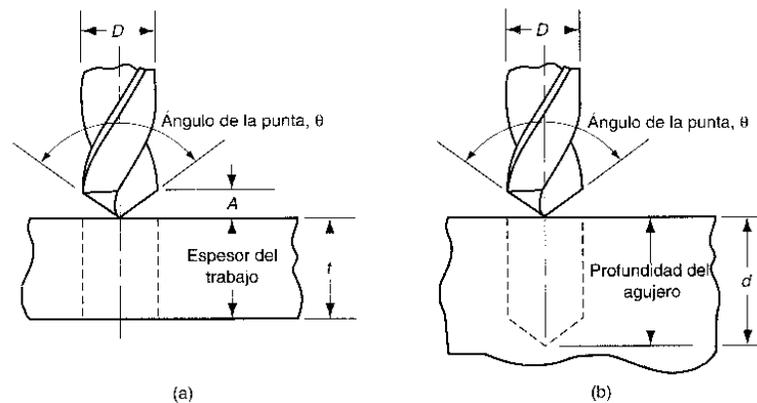


FIGURA 36. Dos tipos de agujeros: (a) agujero completo y (b) agujero ciego.

La velocidad de remoción de metal en el agujereado se determina como el producto de la sección transversal de la broca y la velocidad de avance:

$$MRR = f_r \cdot \pi \cdot D \quad (11)$$

Esta ecuación es válida solamente después de que la broca alcance el diámetro completo y excluye la aproximación de la broca al trabajo.

7.2.3. Operaciones relacionadas con el agujereado

Varias operaciones se relacionan con el agujereado. En la siguiente lista, muchas de las operaciones son posteriores al agujereado. Primero debe hacerse un agujero por agujereado y después mortificarse por alguna de estas operaciones. El centrado y el punteado son excepciones a esta regla. Todas las operaciones usan herramientas rotatorias. Las operaciones descritas aquí se ilustran en la fig. 37:

(a) *Escariado*. Se usa para: agrandar ligeramente un agujero, suministrar una mejor tolerancia en su diámetro y mejorar su acabado superficial. La herramienta se llama *escariador* el cual tiene por lo general ranuras rectas.

(b) *Roscado interior*. Esta operación se realiza por medio de un *macho* y se usa para cortar una rosca interior en un agujero existente.

(e) *Abocardado*. En el abocardado se produce un agujero escalonado en el cual un diámetro más grande sigue a un diámetro más pequeño parcialmente dentro del agujero. Se usa un agujero abocardado para asentar las cabezas de los pernos dentro de un agujero de manera que no sobresalgan de la superficie.

(d) *Avellanado*. Es una operación similar al abocardado salvo que el escalón en el agujero tiene forma de cono para tornillos y pernos de cabeza plana.

(e) *Centrado*. También llamado agujereado central, esta operación taladra un agujero inicial para establecer con precisión el lugar donde se perforará el siguiente agujero. La herramienta se llama *mecha centradora*.

(f) *Refrentado*. Es una operación similar al fresado que se usa para suministrar una superficie maquinada plana en la parte de trabajo en una área localizada.

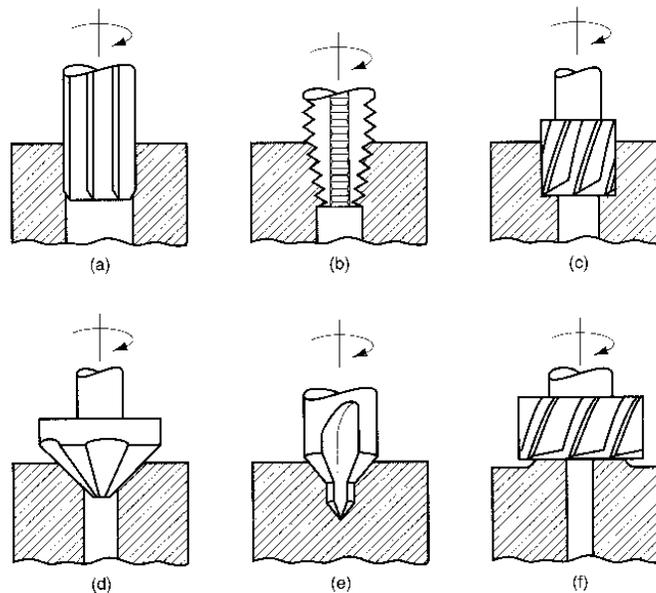


FIGURA 37. Operaciones de maquinado relacionadas con el agujereado: (a) escariado, (b) roscado interior, (c) abocardado, (d) avellanado, (e) centrado y (f) refrentado.

7.2.4. Perforadora

La perforadora es la máquina estándar para perforar. Hay varios tipos de perforadoras, de los cuales el básico es el vertical (fig. 38).

El *taladro vertical* se mantiene sobre el piso y está formado por una mesa para sostener la pieza de trabajo, un cabezal del taladro con un husillo mecanizado para la broca, y una base y columna para soporte. Una perforadora similar, pero más pequeña es el *taladro de banco*, el cual se monta sobre una mesa o un banco en lugar de pararse sobre el piso.

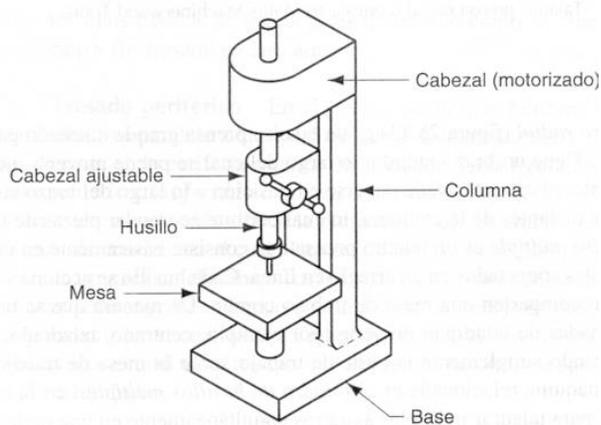


FIGURA 38. Perforadora vertical.

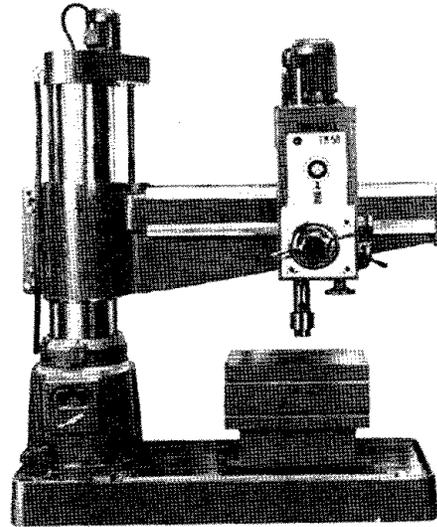


FIGURA 39. Perforadora radial.

El *taladro radial* (fig. 39) es una perforadora grande diseñado para cortar agujeros en piezas grandes. Tiene un brazo radial a lo largo del cual se puede mover y ajustarse el cabezal del taladro. Por lo tanto, el cabezal puede ponerse en posición a lo largo del brazo en lugares que son significativamente distantes de la columna, lo cual permite acomodar piezas de trabajo grandes.

Un *taladro múltiple* es una perforadora que consiste básicamente en una serie de dos a seis taladros verticales conectados en un arreglo en línea. Cada husillo se acciona y opera en forma independiente, pero comparten una mesa de trabajo común.

De manera que se pueden realizar operaciones relacionadas de agujereado en serie (por ejemplo, centrado, agujereado, escariado y roscado interior) deslizando simplemente la pieza sobre la mesa de trabajo de un husillo al siguiente. Una máquina relacionada es el *taladro de husillos múltiples*, en la cual están conectados varios husillos para perforar múltiples agujeros simultáneamente en una pieza de trabajo.

Existen además las *perforadoras* de control numérico para controlar el posicionado de los agujeros en las piezas de trabajo. Estas perforadoras están frecuentemente equipadas con torretas para sostener herramientas múltiples, que pueden seleccionarse bajo control de un programa de control numérico. Se usa el término *taladro revólver de control numérico* para este tipo de máquinas.

La sujeción de la pieza en una perforadora se logra fijándola en un tornillo de banco, sujetador o guía. Un *tornillo de banco* es un dispositivo de sujeción de propósito general que posee dos *mordazas* que aprietan la pieza en posición. Un *sujetador* es un dispositivo que fija la pieza diseñado específicamente para la pieza de trabajo.

El sujetador puede diseñarse para lograr mayor precisión en el posicionado de la pieza con respecto a la operación de la máquina, mayores velocidades de proyección y mayor conveniencia para el operador.

Una *guía* es un dispositivo sujetador del trabajo que se diseña también especialmente para la pieza de trabajo. La característica distintiva entre la guía y el sujetador es que la guía suministra un medio para guiar la herramienta durante la operación de agujereado. Un sujetador no posee esta característica de guía. Una guía que se usa para agujereado se llama *guía de taladro*.

7.3. FRESADO

El *fresado* es una operación de maquinado en la cual se hace pasar una pieza de trabajo enfrente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante llamado *cortador volante*).

El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección de avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del agujereado.

En el agujereado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación. La herramienta de corte en fresado se llama *fresa* y los bordes cortantes se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es *una fresadora*.

La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear otras formas mediante la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de dicha herramienta. Debido a la variedad de formas posibles y a sus altas velocidades de producción, el fresado es una de las operaciones de maquinado más versátiles y ampliamente usadas.

El fresado es una operación de *corte interrumpido*; los dientes de la fresa entran y salen de la pieza en cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y somete a los dientes a un ciclo de fuerzas de impacto y choque térmico en cada rotación. El material de la herramienta y la geometría del cortador deben diseñarse para soportar estas condiciones.

7.3.1. Tipos de operaciones de fresado

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado como se muestra en la fig. 40 (a) fresado periférico y (b) fresado en las caras.

Fresado periférico: En el *fresado periférico*, también llamado *fresado plano*, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador.

En la fig. 41 se muestran varios tipos de fresado periférico: (a) *fresado de placa*, la forma básica de fresado periférico en la cual el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados; (b) *ranurado*, también llamado *fresado de ranuras*, en el cual el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo (cuando la fresa es muy delgada se puede usar esta operación para tallar ranuras angostas o para cortar una pieza de trabajo en dos, llamado *fresado aserrado*); (c) *fresado lateral*, en el cual la fresa maquina el lado de una pieza de trabajo; y (d) *fresado paralelo simultáneo*, el cual es el mismo que el fresado natural, excepto que el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo.

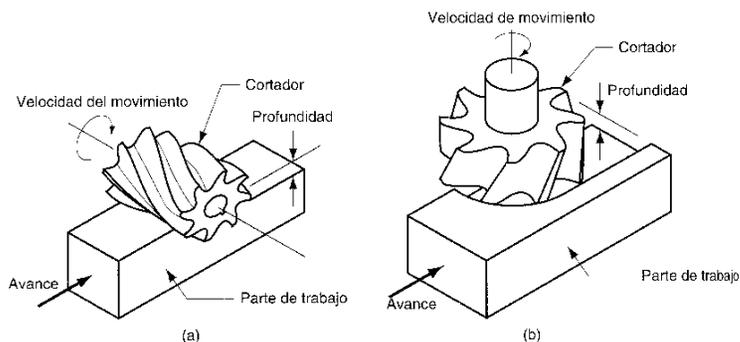


FIGURA 40 Dos tipos básicos de la operación de fresado: (a) fresado periférico o plano y (b) fresado frontal.

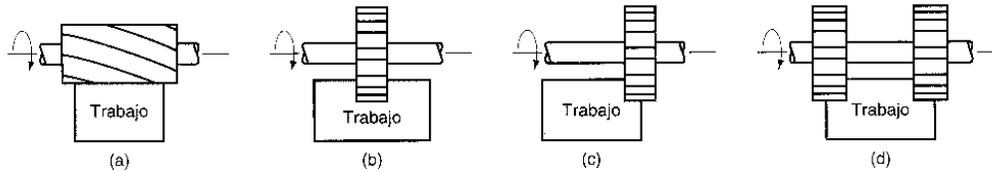


FIGURA 41. Fresado periférico: (a) fresado de placa, (b) ranurado, (c) fresado lateral y (d) fresado paralelo simultáneo.

En el fresado periférico hay dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa con respecto al trabajo. Estas direcciones distinguen dos formas de fresado, fresado ascendente y fresado descendente que se ilustran en la fig. 42.

En el *fresado ascendente*, también llamado *fresado convencional*, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando cortan el trabajo. Es decir, cortan "contra el avance".

En el *fresado descendente*, también llamado *fresado tipo escalamiento*, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado "con el avance".

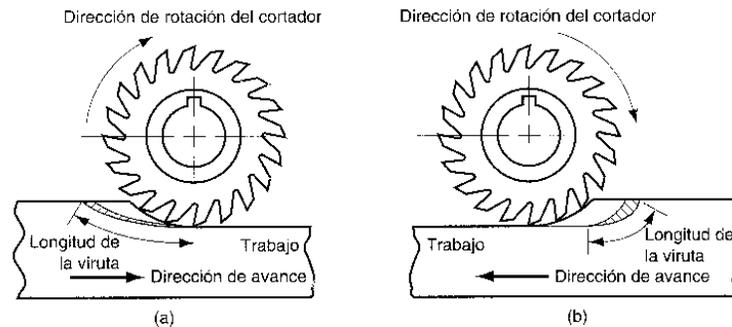


FIGURA 42. Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes: (a) fresado ascendente y (b) fresado descendente.

La geometría relativa de estas dos formas de fresado tiene sus diferencias en las acciones de corte. En el fresado ascendente, la viruta formada por cada diente del cortador comienza muy delgada y aumenta su espesor durante el paso del diente. En el fresado descendente, cada viruta empieza gruesa y se reduce a través del corte.

La longitud de una viruta en el fresado descendente es menor que en el fresado ascendente (en nuestra figura la diferencia está exagerada para mayor comprensión). Esto significa una reducción en el tiempo de trabajo por volumen de material cortado, lo cual tiende a incrementar la vida de la herramienta en el fresado descendente.

La dirección de las fuerzas de corte difieren en el fresado ascendente y descendente. La dirección de la fuerza de corte es tangencial a la periferia de la fresa para los dientes que están enganchados en el trabajo. En el fresado ascendente hay una tendencia a levantar la pieza de trabajo al salir los dientes del material. En el fresado descendente la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, y por esa causa el trabajo se mantiene contra la mesa de la máquina de fresado.

Fresado frontal: En el *fresado frontal*, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta por los bordes o filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa. Cuando el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la pieza de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados, se *denomina fresado frontal convencional*, el cual se ilustra en la fig.43(a).

De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas, varias de ellas se ilustran en la fig. 43 (b): *fresado parcial* de caras o *parcial frontal*, en el cual la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; (c) *fresado terminal*, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la parte; (d) *el fresado de perfiles* es una forma de fresado terminal en el cual se corta una parte plana de la periferia; (e) *fresado de cavidades*, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en partes planas; (f) *fresado de contorno superficial*, en el cual una fresa con punta de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia adelante y hacia atrás y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional. Se requiere el mismo control básico para maquinarse los contornos de moldes y dados en cuyo caso esta operación se llama *tallado o contorneado de dados*.

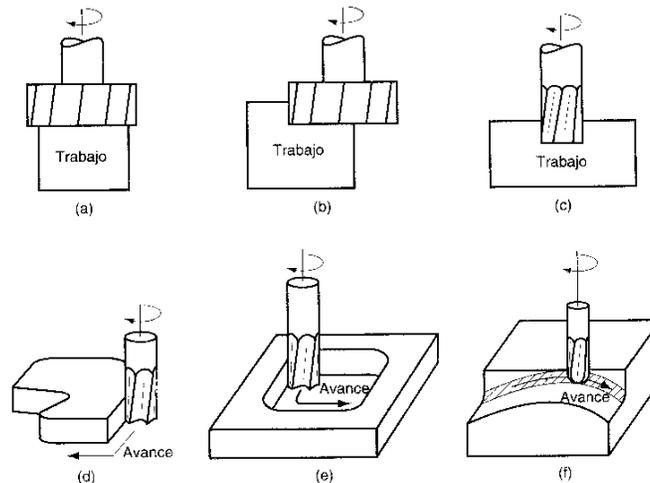


FIGURA 43. Fresado frontal: (a) fresado frontal convencional, (b) fresado de frente parcial, (c) fresado terminal, (d) fresado de perfiles, (e) fresado de cavidades y (f) fresado de contorno superficial.

7.3.2. Fresas

La clasificación de las fresas como se les conoce comúnmente, está muy asociada con las operaciones de fresado que acabamos de describir. Los tipos de fresas incluyen los siguientes:

fresas planas: Éstos se usan en el fresado periférico de planchas. Como se indica en la fig. 40(a), son fresas cilíndricas con varias filas de dientes. Los bordes cortantes se orientan por lo general en un ángulo de hélice (como en la figura) para reducir el impacto de la entrada en el trabajo; estas fresas se llaman *cortadoj-es helicoidales*. Los elementos de la geometría de una fresa plana se muestran en la fig. 44.

fresas formadoras: En estos cortadores periféricos, los bordes cortantes tienen un perfil especial que imparten el trabajo. Una aplicación importante está en la fabricación de engranes, en el cual la fresa formadora tiene una forma que corta las ranuras entre los dientes adyacentes de los engranes, formando de esta manera la geometría del diente del engrane.

fresas frontales: Éstos se diseñan con dientes que cortan tanto lateralmente como en la periferia de la fresa. Las fresas frontales se pueden hacer de acero de alta velocidad como se muestra en la fig. 40(b), o se pueden diseñar para usar insertos de carburo cementado. La fig. 45 muestra una fresa frontal de cuatro dientes que usa insertos

fresa terminal: Como se muestra en la fig. 43(c), una fresa terminal se parece a una broca, pero si la observamos con más atención está diseñada para un corte primario con los dientes periféricos más que con su extremo -una broca corta solamente en su extremo al penetrar en el trabajo.

Las fresas terminales se diseñan con extremos cuadrados, extremos con radio y extremos de bola. Los extremos pueden usarse para fresado frontal, fresado de perfiles y cavidades, cortar ranuras, grabar, fresar contornos de superficies y tallar dados.

7.3.3. Condiciones de corte en fresado

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Ésta se puede convertir a la velocidad de rotación del husillo usando una fórmula que por ahora nos debe ser familiar:

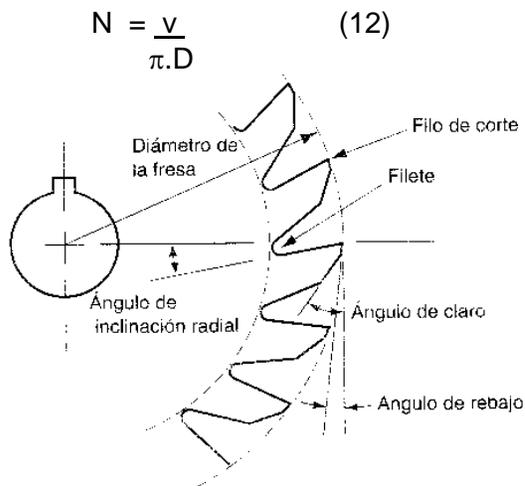


FIGURA 44. Elementos de la geometría de una fresa plana de 18 dientes.

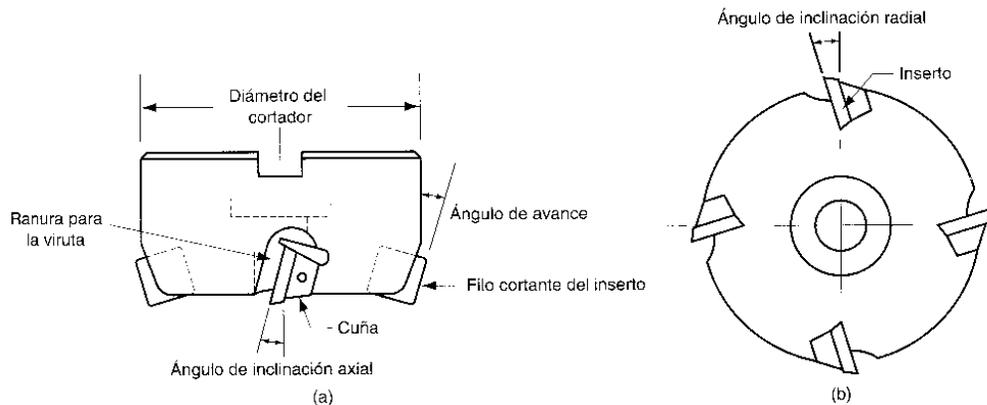


FIGURA 45. Elementos de la geometría de una fresa frontal de cuatro dientes: (a) vista lateral y (b) vista inferior.

El avance f en fresado se determina por lo general como el avance por diente cortante, llamado *carga de viruta*, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a velocidad de avance tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa como sigue:

$$f_r = N \cdot n_t \cdot f \quad (13)$$

donde f_r = velocidad de avance en mm/min; N = velocidad del husillo en rev/min; n_t número de dientes en la fresa; y f = carga de viruta en mm/diente.

La remoción de material en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance.

Por consiguiente, si una operación de fresado de una plancha corta una pieza de trabajo con ancho w a una profundidad d , la velocidad de remoción de material es

$$MRR = w \cdot d \cdot f_r \quad (14)$$

Esto ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche completo. La ecuación 14 se puede aplicar al fresado de acabado, fresado lateral, fresado frontal y otras operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe tener en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa. Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de la plancha, la distancia de aproximación A para alcanzar la velocidad de corte completo se determina mediante

$$A = [d(D - d)]^{1/2} \quad (15)$$

donde d = profundidad de corte, mm; D = diámetro de la fresa, mm. El tiempo para fresar la pieza de trabajo T_m es por lo tanto

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \quad (16)$$

Para el fresado frontal es costumbre dejar para la aproximación la distancia A más una distancia O , que representa la profundidad de desbaste inicial. Hay dos casos posibles, como se muestra en la fig. 47.

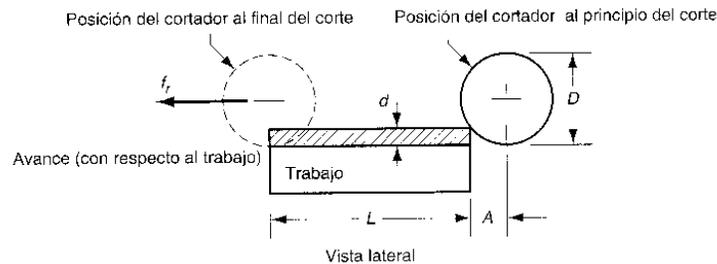


FIGURA 46. Fresado de placa (periférico) mostrando la entrada de la fresa en la pieza de trabajo.

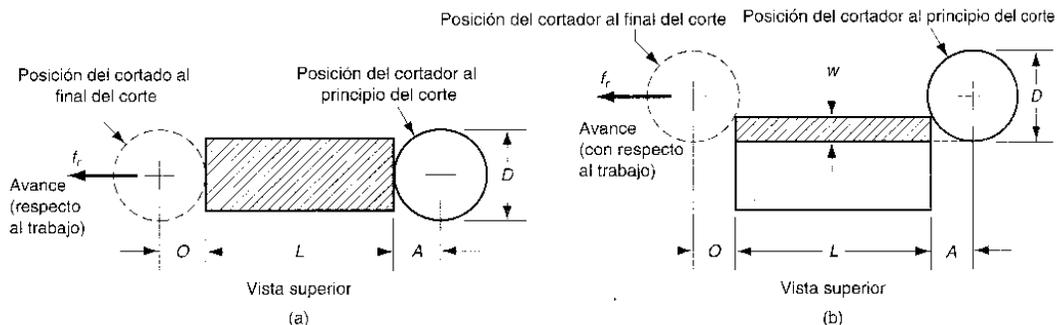


FIGURA 47. Fresado frontal mostrando las distancias de aproximación y de recorrido adicional para dos casos: (a) cuando el fresador está centrado sobre la pieza de trabajo y (b) cuando el cortador está desplazado hacia un lado de la pieza de trabajo.

En ambos casos $A = O$. El primer caso es cuando la fresa se centra sobre la pieza de trabajo rectangular. En la figura 25.21 (a) es evidente que A y O son iguales a la mitad del diámetro del cortador. Esto es,

$$A = O = D / 2 \quad (17)$$

donde D = diámetro de la fresa, mm.

El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados del trabajo, como se muestra en la fig. 47(b). En este caso., las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por

$$A = O = [w(D - w)]^{1/2} \quad (18)$$

donde w = ancho del corte, mm. Por lo tanto. el tiempo de maquinado en cada caso está dado por

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \quad (19)$$

7.3.4. Máquinas fresadoras

Las máquinas fresadoras deben tener un husillo rotatorio para el cortador y una mesa para sujetar, poner en posición y hacer avanzar la pieza de trabajo. Varios diseños de máquinas herramienta satisfacen estos requerimientos. Las máquinas fresadoras se pueden clasificar en horizontales o verticales.

Una *máquina fresadora horizontal* tiene un husillo horizontal, y este diseño es adecuado para realizar el fresado periférico (por ejemplo, fresado de planchas, ranurado, y fresado lateral y atravesado) sobre partes de trabajo que tienen forma aproximadamente cúbica.

Una *máquina fresadora vertical* tiene un husillo vertical, y esta orientación es adecuada para fresado frontal, fresado de acabado, fresado de contorno de superficies y tallado de dados sobre partes de trabajo relativamente planas. En esta sección, clasificamos las máquinas fresadoras dentro de los siguientes tipos: 1) rodilla y columna, 2) tipo bancada, 3) tipo cepillo, 4) fresas trazadoras y 5) máquinas fresadoras CNC.

Máquinas fresadoras de rodilla y columna: La *máquina fresadora de rodilla y columna* es la máquina herramienta básica para fresado. Deriva su nombre del hecho que sus dos principales componentes son una *columna* que soporta el husillo y una *rodilla* (se parece a una rodilla humana) que soporta la mesa de trabajo. Se puede disponer de máquinas horizontales o verticales, como se ilustra en la fig. 48. En la versión horizontal, un *árbol* soporta generalmente a la fresa. El árbol es básicamente una flecha que sostiene la fresa y se acciona mediante el husillo principal. En las máquinas horizontales se provee un brazo para sostener el árbol. En las máquinas de rodilla y columna verticales las fresas se pueden montar directamente en el husillo principal.

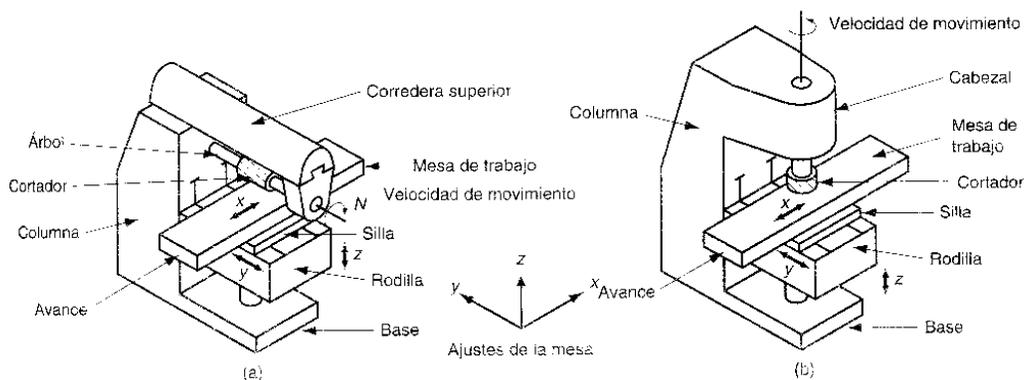


FIGURA 48 Dos tipos básicos de máquina fresadora de rodilla y columna: (a) horizontal y (b) vertical.

Una característica de las máquinas fresadoras de rodilla y columna que las hace tan versátiles es la capacidad de la mesa de trabajo para hacer avanzar el trabajo en cualquiera de los tres ejes x , y , o z .

Estas direcciones de los ejes se indican en la figura. La mesa de trabajo se puede mover en la dirección x , la silla se puede mover en la dirección y , y la rodilla se puede mover verticalmente para lograr el movimiento z . Se pueden identificar dos máquinas especiales de rodilla y columna. Una es la *máquina fresadora universal* [fig. 49(a)] la cual tiene una mesa que se puede girar en un plano horizontal (sobre un eje vertical) a cualquier ángulo especificado. Esto facilita el corte de formas helicoidales sobre las piezas de trabajo.

Otra máquina especial es la *fresadora con corredera* [fig. 49(b)] en la cual el cabezal de la herramienta que contiene el husillo, se localiza sobre el extremo de una corredera horizontal; la corredera se puede ajustar hacia dentro y hacia fuera sobre la mesa de trabajo para dirigir la fresa hacia el trabajo. El cabezal de la herramienta se puede girar también para lograr una orientación angular de la fresa hacia el trabajo. Estas características aportan considerable versatilidad en el maquinado de varias formas de trabajo.

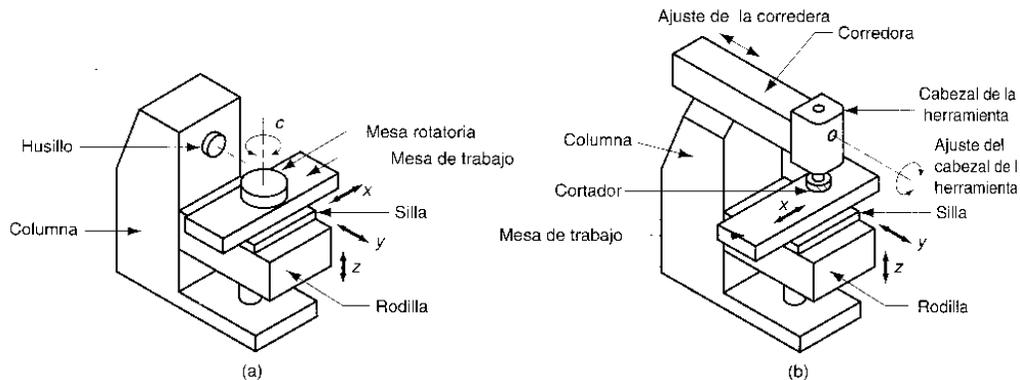


FIGURA 49. Tipos especiales de máquinas fresadoras de rodilla y columna: (a) universal (se omiten la corredera superior, el árbol y el cortador, para mayor claridad) y (b) tipo corredera.

Fresadora tipo bancada: Las *máquinas fresadoras tipo bancada* se diseñan para la producción en masa. Están construidas con mayor rigidez que las máquinas de rodilla y columna, y permiten las velocidades de avance más críticas y las profundidades de corte que se necesitan para las altas velocidades de remoción de material.

La construcción característica de las máquinas fresadoras tipo cama se muestra en la fig. 50. La mesa de trabajo está montada directamente a la cama de la máquina herramienta en lugar del tipo menos rígido de rodilla y columna. Esta construcción limita el posible movimiento longitudinal de la mesa para pasar el trabajo por delante de la fresa. La fresa está montada en un cabezal de husillo que puede ajustarse verticalmente a lo largo de la columna de la máquina. Las máquinas de bancada con un solo husillo se llaman *máquinas simplex*, como se muestra en la fig. 50, y están disponibles en modelos verticales u horizontales. Las *fresadoras dúplex* usan dos cabezales de husillo, los cuales se posicionan por lo general horizontalmente sobre los lados opuestos de la cama para realizar operaciones simultáneas durante un avance del trabajo. Las *máquinas tríplex* añaden un tercer husillo montado verticalmente sobre la cama para darle mayor capacidad a la máquina.

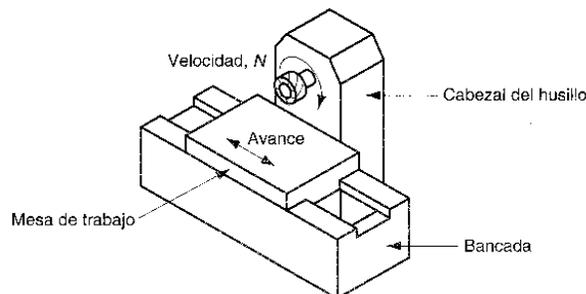


FIGURA 50. Máquina fresadora tipo cama simplex de husillo horizontal.

Máquinas tipo cepillo: Las *máquinas tipo cepillo* forman la categoría más grande de máquinas fresadoras. Su apariencia general y su construcción son las de un cepillo grande (fig.56); la diferencia es que en lugar del cepillado llevan a cabo el fresado. Por consiguiente, uno o más cabezales de fresado sustituyen a las herramientas de corte de una sola punta que se usan en los cepillos, y el movimiento del trabajo que pasa enfrente de la herramienta es un movimiento de velocidad de avance más que un movimiento de velocidad de corte. Las fresas tipo cepillo se construyen para maquinar partes muy grandes. La mesa de trabajo y la cama de la máquina son pesadas y relativamente bajas, casi al ras del piso, y los cabezales fresadores se sostienen sobre una estructura puente que se extiende a través de la mesa.

Fresas trazadoras: Una *fresa trazadora*, también llamada *fresa perfiladora*, está diseñada para reproducir una geometría irregular de la parte creada sobre una plantilla. Un estilete de prueba controlado por avance manual o automático sigue la plantilla, mientras el cabezal de fresado duplica la trayectoria del estilete para maquinar la forma deseada. Las máquinas trazadoras se pueden dividir en los siguientes tipos:

- 1) *trazado x-y*, en la cual la plantilla es una forma plana con un contorno que se perfila usando un control de dos ejes,
- 2) *trazado x-y-z*, en el cual el estilete sigue un patrón tridimensional usando un control de tres ejes.

Las fresadoras trazadoras se han usado para crear formas que no pueden ser generadas fácilmente por una acción de avance simple de la parte de trabajo frente a la fresa. Sus aplicaciones incluyen el maquinado de moldes y matrices. En años recientes, muchas aplicaciones que se hacían antes en fresas trazadoras se hacen ahora en máquinas fresadoras de control numérico computarizado (CNC).

Máquinas fresadoras CNC: En las *máquinas fresadoras CNC* la trayectoria de la fresa se controla por datos numéricos en lugar de plantillas físicas. Las máquinas fresadoras CNC están adaptadas especialmente para el fresado de perfiles, fresado de cavidades, fresado de contorno de superficies y operaciones de tallado de matrices, en las que se debe controlar simultáneamente dos o tres ejes de la mesa de trabajo. Normalmente se requiere el operador para cambiar las fresas y cargar y descargar las partes de trabajo.

5.4. CENTROS DE MAQUINADO Y CENTROS DE TORNEADO

Un centro de maquinado es una máquina altamente automatizada capaz de realizar múltiples operaciones de maquinado en una instalación bajo CNC (control numérico computarizado) con la mínima intervención humana. Las operaciones típicas son aquellas que usan herramientas de corte rotatorio, como los cortadores y las brocas. Las siguientes características hacen de estos centros de maquinado una máquina productiva:

Cambio automático de herramientas. Para cambiar de una operación de maquinado a la siguiente se deben cambiar las herramientas. Esto se hace en un centro de maquinado por medio de un programa de control numérico que controla a un cambiador automático de herramientas diseñado para intercambiar cortadores entre los husillos de la máquina y un *tambor de almacenamiento de herramientas*. Las capacidades de estos tambores fluctúan por lo general de 16 a 80 herramientas de corte.

Paletas transportadoras. Algunos centros de maquinado están equipados con dos o más paletas transportadoras que pueden transferir automáticamente la pieza de trabajo al husillo de la máquina. Con dos paletas, el operador puede descargar las partes previamente maquinadas y cargar las siguientes, mientras la máquina herramienta se encarga de maquinar la parte en turno. Esto reduce el tiempo no productivo en la máquina.

Posicionado automático de las partes de trabajo. Muchos centros de maquinado tienen más de tres ejes. Uno de los ejes adicionales se diseña frecuentemente como una mesa rotatoria para poner la parte en posición formando un ángulo específico con respecto al husillo. La mesa rotatoria permite a la herramienta de corte desempeñar el maquinado en cuatro lados de la parte en una sola instalación.

Los centros de maquinado se clasifican en horizontales, verticales o universales. La designación se refiere a la orientación del husillo. Los centros de maquinado horizontales maquinan normalmente partes de forma cúbica donde la herramienta de corte tiene acceso a los cuatro lados verticales del cubo.

Los centros de maquinado vertical están adaptados para partes planas en los cuales la herramienta puede maquinar la superficie superior. Los centros de maquinado universal tienen cabezales de trabajo que pueden girar los ejes del husillo a cualquier ángulo entre el vertical y el horizontal, como se ilustra en la fig. 51.

El éxito de los centros de maquinado CNC ha conducido al desarrollo de centros de torneado CNC. Un *centro de torneado CNC* moderno (fig. 52.) es capaz de desempeñar varias operaciones de torneado y operaciones relacionadas, torneado de contorno y secuenciado automático de herramientas, todas bajo control computarizado. Además, los centros de torneado sofisticado pueden realizar:

- 1) calibrado de partes de trabajo (verificación de las dimensiones clave después del maquinado),
- 2) control de la vida de las herramientas (sensores que indican cuando las herramientas están desgastadas),
- 3) cambio automático de herramientas cuando se desgastan, y además
- 4) cambio automático de piezas de trabajo al final de cada ciclo.

Un desarrollo reciente de la tecnología de máquinas herramienta CNC es el *centro de torno y fresa CNC*. Esta máquina tiene la configuración natural de un centro de torneado, y además puede posicionar una pieza de trabajo cilíndrica en un ángulo específico, de manera que una herramienta rotatoria de corte (por ejemplo, una fresa) pueda maquinar formas en la superficie externa de la pieza, como se ilustra en la fig. 53. Un centro ordinario de torneado no tiene la capacidad de parar la pieza de trabajo en una posición angular definida y no tiene husillos para herramientas rotatorias.

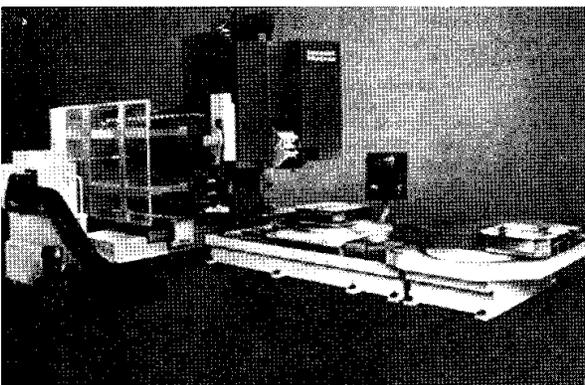


FIGURA 51. Un centro de maquinado universal. La capacidad de orientar el cabezal de trabajo hace de ésta, una máquina de cinco ejes. (cortesía de Cincinnati Milacron).

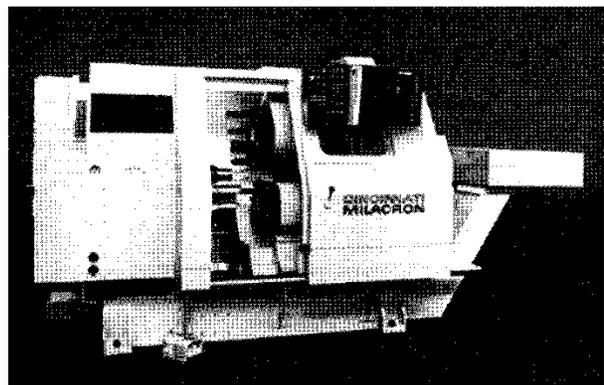


FIGURA 52. Centro de torneado de cuatro ejes y CNC.

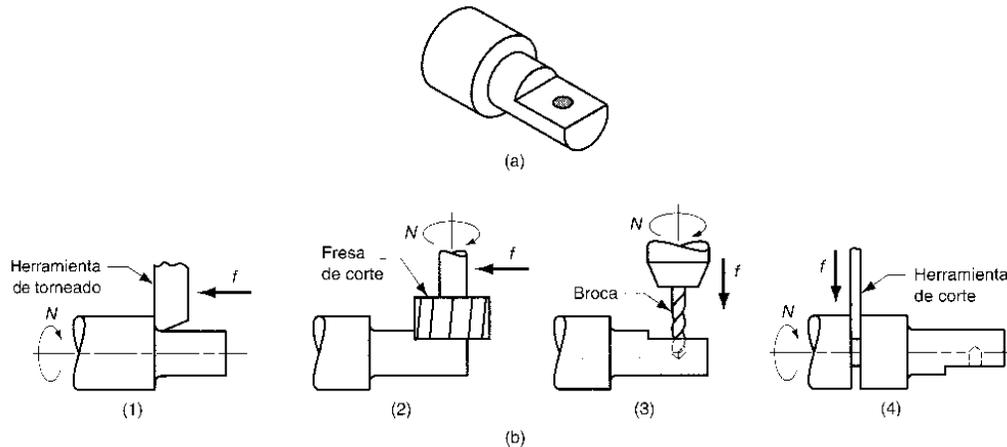


FIGURA 53. Operación de un centro de torneado y fresado: (a) ejemplo de una pieza con superficies torneadas fresadas y taladradas y (b) secuencia de operaciones en un centro de torneado y fresado: (1) torneado de un segundo diámetro, (2) fresado plano en una posición angular programada de la parte, (3) agujereado de un agujero con la parte en la misma posición programada y (4) corte.

5.5. OTRAS OPERACIONES DE MAQUINADO

Además del torneado, fresado y agujereado, se deben incluir otras operaciones de maquinado en nuestro estudio: 1) perfilado y cepillado, 2) escariado y 3) aserrado.

5.5.1. Perfilado (limado) y cepillado

El perfilado y el cepillado son operaciones similares, ambas incluyen el uso de una herramienta de corte de punta sencilla movida linealmente con respecto a la pieza de trabajo. En el perfilado convencional y cepillado, se crea una superficie plana y recta. La diferencia entre las dos operaciones se ilustra en la fig. 54. En el perfilado, el movimiento de velocidad se obtiene al mover la herramienta de corte, mientras que en el cepillado se logra con el movimiento de la pieza de trabajo.

Las herramientas de corte usadas en el perfilado y cepillado son herramientas de punta sencilla. A diferencia del torneado, en el perfilado y cepillado el corte se interrumpe, y somete a la herramienta a cargas de impacto a la entrada del trabajo. Además, estas máquinas herramienta están limitadas a bajas velocidades debido a su movimiento de vaivén. Estas condiciones dictan normalmente el uso de herramientas de corte de acero de alta velocidad.

Perfilado: El perfilado se ejecuta en una máquina herramienta llamada *perfiladora* (fig. 55). Los componentes de la perfiladora incluyen un ariete o *corredera* que se mueve con respecto a la *columna* para proveer el movimiento de corte, y una mesa de trabajo que sujeta la pieza y realiza el movimiento de avance. El movimiento del ariete es una carrera hacia adelante para lograr el corte y una carrera de regreso durante la cual la herramienta se eleva ligeramente para esquivar a la pieza, e inmediatamente se coloca en posición para el siguiente paso.

Al completar cada carrera de retomo, la mesa de trabajo avanza lateralmente con respecto al movimiento del ariete a fin de hacer avanzar la pieza. El avance se especifica en mm/carrera. El mecanismo de transmisión para la corredera puede ser hidráulico o mecánico. La transmisión hidráulica tiene mayor flexibilidad para ajustar la longitud de la carrera y una velocidad más uniforme durante la carrera hacia adelante, pero es más costosa que una unidad de transmisión mecánica.

Tanto la transmisión hidráulica como la mecánica están diseñadas para lograr mayores velocidades en la carrera de retorno (sin corte) que sobre el avance hacia adelante (cortante), por consiguiente una mayor proporción del tiempo se dedica al corte.

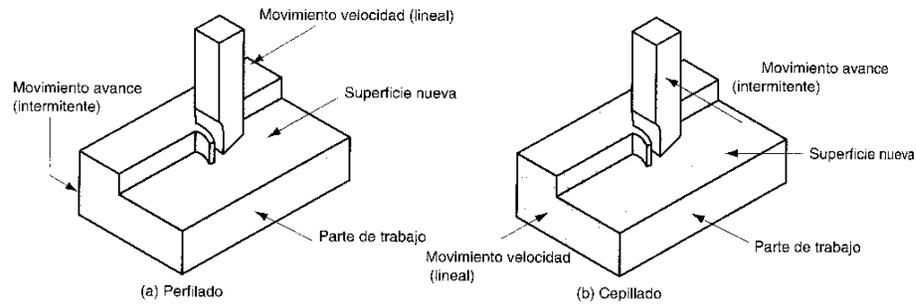


FIGURA 54. (a) Perfilado y (b) cepillado.

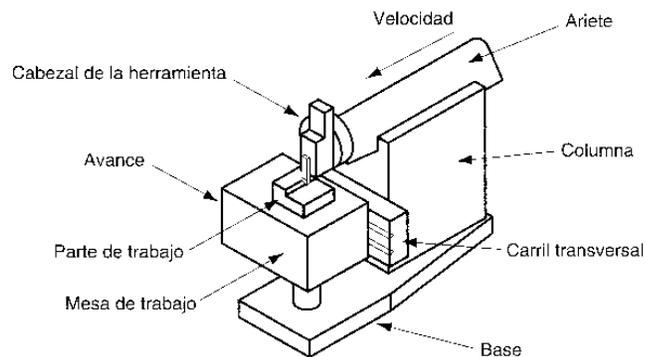


FIGURA 55. Componentes de un perfilador.

Cepillado: La máquina herramienta para cepillado se llama *cepillo*. La velocidad de corte se logra por medio de una mesa de trabajo oscilante que mueve la pieza posterior de una herramienta de corte de punta sencilla. La construcción y la capacidad de movimiento de un cepillo permite el maquinado de partes mucho más grandes que las de un perfilador. Los cepillos se pueden clasificar como cepillos de mesa abiertos lateralmente o cepillos de doble columna.

Los *cepillos de mesa abiertos lateralmente*, también conocidos como *cepillos de columna simple* (fig. 56), tienen una sola columna que soporta el riel transversal sobre el cual se mueve el cabezal de la herramienta. Se puede montar otro cabezal de herramienta que avanza a lo largo de la columna vertical.

Los cabezales de herramienta múltiple permiten más de un corte en cada paso. Al completarse cada carrera, cada cabezal de corte se mueve con respecto al riel transversal (o columna) para lograr un movimiento intermitente. La configuración del cepillo de mesa abierto lateralmente permite maquinar partes de trabajo muy anchas.

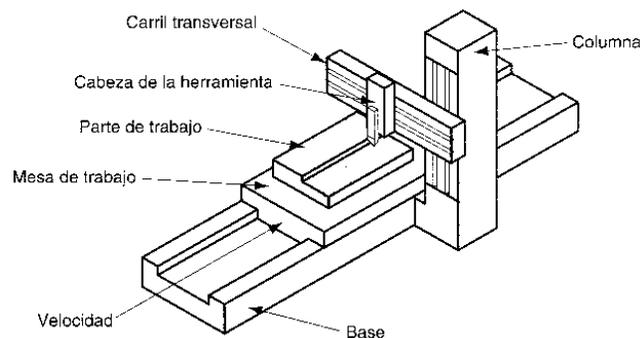


FIGURA 56. Cepillo de mesa, abierto lateralmente.

Un cepillo de doble columna tiene dos columnas, una a cada lado de la cama y mesa de trabajo. Las columnas sostienen el riel transversal, sobre el cual se montan uno o más cabezales de herramienta. Las dos columnas proporcionan una estructura más rígida para la operación; sin embargo, las dos columnas limitan el ancho del trabajo que se puede manejar en esta máquina.

Operaciones relacionadas: El perfilado y cepillado se pueden usar para maquinarse otras superficies diferentes a las planas. La restricción es que las superficies deben ser rectas. Esto permite el tallado de canales, ranuras, dientes de engranes y otras formas, como las ilustradas en la fig. 57. Para cortar algunas de estas formas, es necesario especificar geometrías especiales diferentes a las herramientas estándar de punta sencilla. De hecho, las herramientas especiales para maquinarse se usan algunas veces para este fin. Un ejemplo importante es el *formador de engranes*, un formador vertical diseñado especialmente para avance rotatorio y cabezal de herramienta sincronizada para generar los dientes de los engranes rectos o cilíndricos.

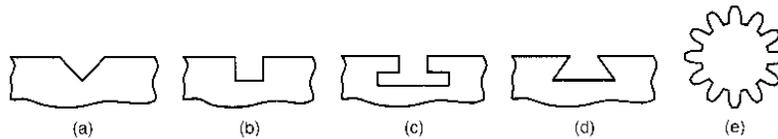


FIGURA 57. Tipos de perfiles que se pueden cortar por perfilado y cepillado: (a) canal en V, (b) canal cuadrado, (c) ranura en T, (d) ranura cola de milano y (e) dientes de engrane.

5.5.2. Escariado (brochado)

El escariado se realiza usando una herramienta de corte de dientes múltiples que se mueve linealmente con relación al trabajo en dirección al eje de la herramienta, como se muestra en la fig. 58. La herramienta de corte se llama *escariador*, y la máquina herramienta se llama *máquina escariadora*.

Éste es un método de maquinado altamente productivo en algunos trabajos que usan el escariado. Las ventajas incluyen buen acabado de la superficie, tolerancias estrechas y una gran variedad de formas posibles de trabajo. Debido a la geometría complicada del escariador y a que frecuentemente se diseña a la medida, la herramienta es costosa.

La terminología y la geometría del escariado se ilustran en la fig. 59. El escariado consiste en una serie de dientes cortantes distintos a lo largo de su longitud. El avance se logra por el incremento del paso entre los dientes sucesivos del escariador. Esta acción de avance es única entre las operaciones de maquinado, ya que muchas operaciones logran el avance por un movimiento de avance relativo que llevan a cabo la herramienta o el trabajo. El material que se remueve totalmente en un solo paso del escariador es el resultado acumulativo de todos los pasos de la herramienta. El movimiento de velocidad se logra por el desplazamiento lineal de la herramienta por enfrente de la superficie de trabajo. La forma de la superficie de corte está determinada por el contorno de los filos de corte sobre el escariador, particularmente el borde final.

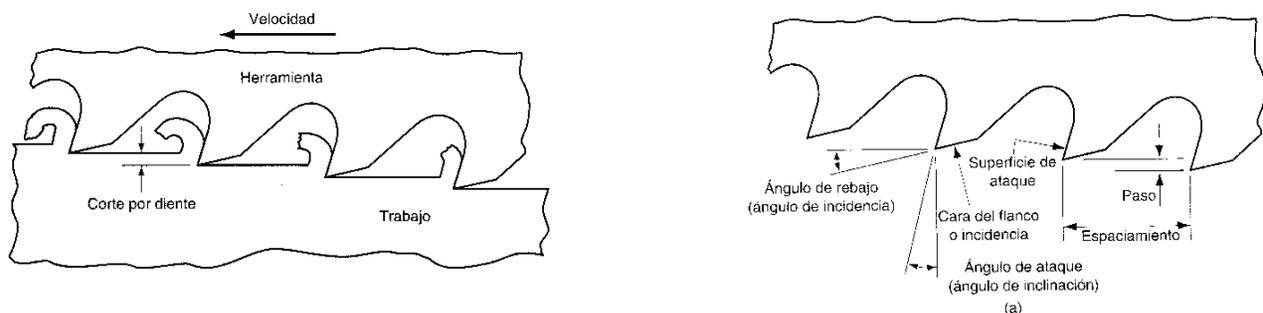


FIGURA 58 Operación de escariado.

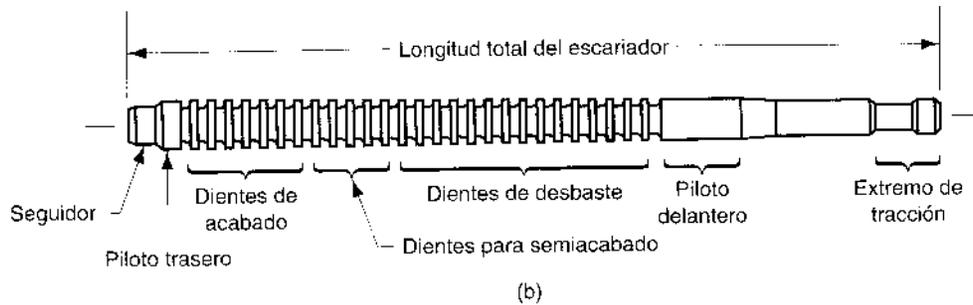


FIGURA 59 El esariador: (a) terminología de la geometría del diente y (b) un esariador típico usado para esariado interno.

Debido a la geometría compleja y a las bajas velocidades que se usan en el esariado, la mayoría de los esariadores se hacen de acero rápido. En el esariado de ciertas fundiciones de hierro, los filos cortantes son insertos de carburo cementado ya sea soldado o fijo por medios mecánicos sobre la herramienta de esariado. Hay dos tipos principales de esariado externo, llamado también esariado superficial, y el interno.

El *esariado externo* se ejecuta sobre la superficie externa de la pieza para crear ciertas formas de la sección transversal en la superficie. La fig.60a muestra algunas posibles secciones transversales que pueden formarse por esariado externo.

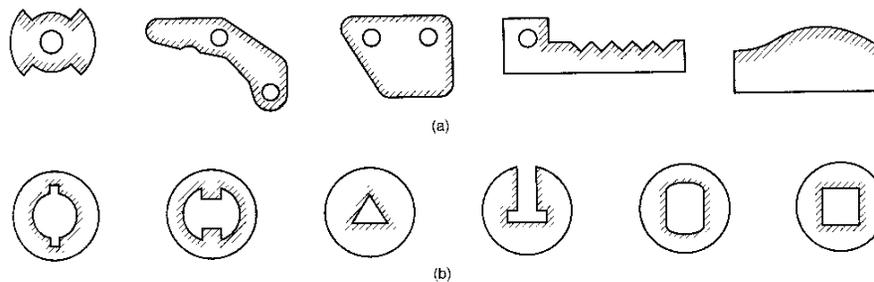


FIGURA 60. Formas de trabajo que se pueden cortar por (a) esariado externo y (b) esariado interno. El sombreado indica las superficies esariadas.

El *esariado interno* se ejecuta en la superficie interna de un agujero de la pieza. Por consiguiente, en la pieza de trabajo debe estar presente un agujero inicial de manera que se pueda insertar el esariador al principio de la carrera de esariado. La fig. 60(b) indica algunas de las formas que pueden producirse por esariado interno.

La función básica de la *máquina esariadora* es suministrar un movimiento lineal y preciso de la herramienta que pasa delante de la posición de la pieza estacionaria, pero hay varias formas en que esto puede hacerse. La mayoría de las máquinas esariadoras se pueden clasificar como máquinas verticales u horizontales.

La *máquina esariadora vertical* (fig. 61) está diseñada para mover el esariador a lo largo de una trayectoria vertical, mientras que la *máquina esariadora horizontal* tiene una trayectoria horizontal. La mayoría de las máquinas de esariado tiran el esariador por delante de la pieza.

Sin embargo, hay excepciones para esta acción de tirado. Una de ellas es un tipo relativamente simple llamado *prensa de esariado* que se usa solamente para esariado interno, la cual empuja la herramienta a través de la pieza. Otra excepción es la *máquina de esariado continuo*, en la cual se fija la pieza a un transportador sin fin que se mueve delante de un esariador estacionario. Debido a su operación continua, esta máquina se puede usar solamente para esariado superficial.

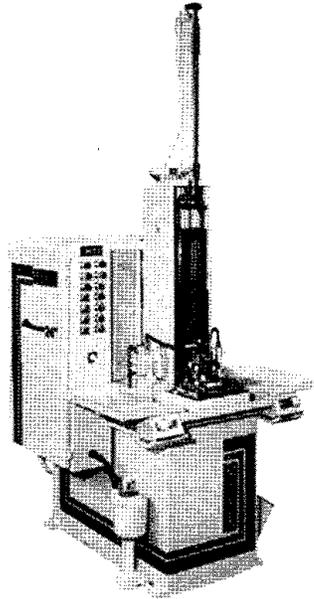


FIGURA 61. Máquina escariadora vertical con carrera de 600 mm.

5.5.3. Aserrado

El aserrado es un proceso en el que se corta una hendidura angosta dentro de la pieza por medio de una herramienta que tiene una serie de dientes estrechamente espaciados. El aserrado se usa normalmente para separar una pieza en dos o para cortar un trozo no deseado de la pieza. A estas operaciones se les llama frecuentemente operaciones de separación. El aserrado es un proceso importante de manufactura, ya que muchas fábricas requieren de operaciones de corte en algunos puntos de su secuencia de manufactura.

En la mayoría de las operaciones de aserrado, la pieza se mantiene estática y la hoja de la *sierra* se mueve con respecto a ella. Hay tres tipos básicos de aserrado, como se muestra en la figura 62, de acuerdo con el tipo de movimiento de la sierra: (a) con hoja de sierra, (b) con sierra de cinta y (e) con sierra circular.

Hoja de sierra: El corte con hoja de sierra seguenta [fig. 62(a)] involucra un movimiento lineal de vaivén de la sierra contra el trabajo. Este método de aserrado se usa frecuentemente en operaciones de trozado. El corte se realiza solamente en la carrera hacia adelante de la sierra. Debido a esta acción de corte intermitente el corte con sierra es por naturaleza menos eficiente que los otros métodos de aserrado, ambos son continuos.

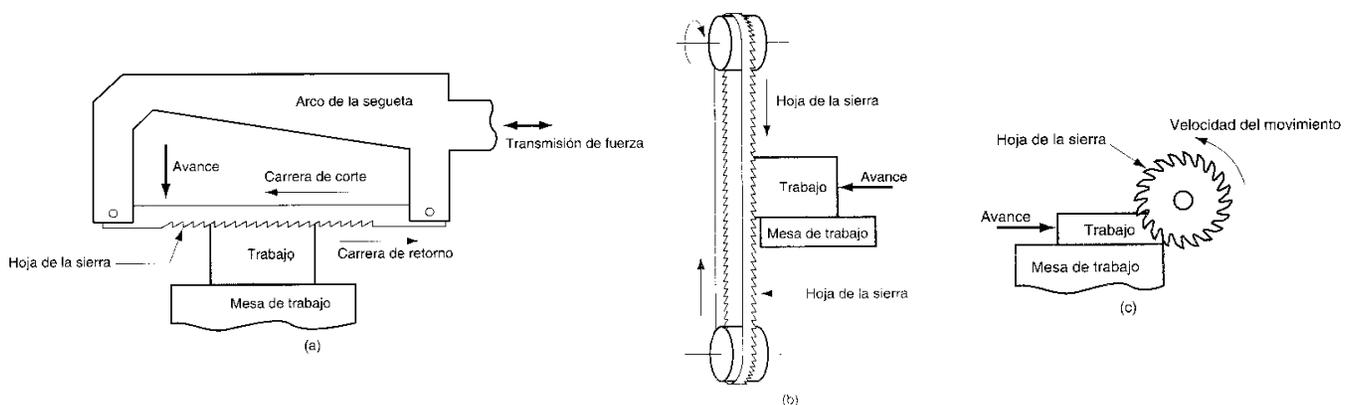


FIGURA 62. Tres tipos de operaciones de aserrado: (a) con hoja de sierra (motorizada), (b) con sierra de cinta (vertical) y (c) con sierra circular.

Una cierra es una herramienta delgada y recta, con dientes cortantes en uno de sus bordes. El corte con cierra se puede hacer en forma mecánica o manual. La *cierra mecanizada* tiene un mecanismo de transmisión en el que la cierra opera a la velocidad deseada, también se aplica una velocidad dada de avance o presión de aserrado.

Sierra de cinta: El *aserrado con cinta* implica un movimiento lineal continuo que utiliza una *sierra cinta hecha en forma de banda* flexible sin fin con dientes en uno de sus bordes. La máquina aserradora es una *sierra de cinta*, que tiene un mecanismo de transmisión con poleas para mover y guiar continuamente la sierra cinta delante del trabajo.

Las sierras cintas se clasifican en verticales u horizontales. La designación se refiere a la dirección del movimiento de la sierra cinta durante el corte. Las sierras cintas verticales se usan para cortar trozos y realizar otras operaciones como calado y ranurado. El *calado* en una sierra cinta implica el corte de una parte perfilada de material plano. El *ranurado* es el corte de una ranura delgada dentro de la pieza, una operación para la cual la sierra cinta es adecuada. El calado y el ranurado son operaciones en las que el trabajo avanza dentro de la sierra cinta.

Las máquinas verticales de sierra cinta pueden operarse ya sea manualmente por un operador que guía y hace avanzar el trabajo manualmente sobre la sierra cinta, o automáticamente, en la cual el trabajo avanza mecánicamente a través de la sierra. Algunas innovaciones recientes en el diseño de sierras cintas han permitido el uso del CNC para realizar el calado de formas complejas. Algunos detalles de la operación de la sierra cinta se ilustran en la fig. 62(b). Las sierras cintas horizontales se usan normalmente para operaciones de corte así como alternativas de corte con cierra mecanizada.

Sierra circular: La *sierra circular* [fig. 62(c)] usa una sierra circular giratoria para suministrar el movimiento continuo de la herramienta frente al trabajo. El corte con sierra circular se usa frecuentemente para cortar barras largas, tubos y formas similares a una longitud específica. La acción de corte es similar a una operación de fresado ranurado, excepto que la sierra circular es más delgada y contiene más dientes que una fresa ranuradora. Las máquinas de sierra circular tienen husillos motorizados que hacen girar la sierra y un mecanismo de avance que conduce la sierra giratoria dentro del trabajo.

Dos operaciones relacionadas con la sierra circular son el corte abrasivo y el aserrado por fricción.

En el *corte abrasivo* se usa un disco abrasivo para ejecutar las operaciones de corte sobre materiales duros que serían difíciles de aserrar con una sierra convencional. En el *aserrado por fricción*, un disco de acero gira contra el trabajo a una velocidad muy alta y produce el calor de fricción necesario para ablandar el material lo suficiente y permitir la penetración del disco a través del trabajo. Las velocidades de corte en ambas operaciones son mucho más rápidas que las de la sierra circular.

Hoja de la sierra: En las tres operaciones de aserrado anteriores, las hojas de la sierra tienen ciertas características comunes que incluyen la forma de los dientes, su espaciamiento y la disposición de los mismos, como se puede apreciar en la fig. 63. La *forma de los dientes* se refiere a la geometría de cada diente de corte. El ángulo de inclinación o ataque, el ángulo del claro, el espaciamiento entre los dientes y otras características de la geometría se muestran en la parte (a) de la figura. El *espaciamiento entre los dientes* es la distancia entre los dientes adyacentes sobre la hoja de la sierra.

Este parámetro determina el tamaño del diente y el tamaño de la garganta entre los dientes. La garganta proporciona un espacio para la formación de viruta por los dientes adyacentes de corte. Las diferentes formas de los dientes se adecúan a los diferentes materiales de trabajo y situaciones de corte.

Se usan dos formas comunes en corte con sierra y corte con cinta, las cuales se muestran en la fig. 63(b). La *disposición de los dientes* permite que la ranura de corte hecha por la hoja de la sierra sea más ancha que el ancho de la hoja en sí; de otra manera la hoja podría atascarse contra las paredes de la ranura hecha por la sierra. En la fig. 63(c) se ilustran dos disposiciones comunes de los dientes.

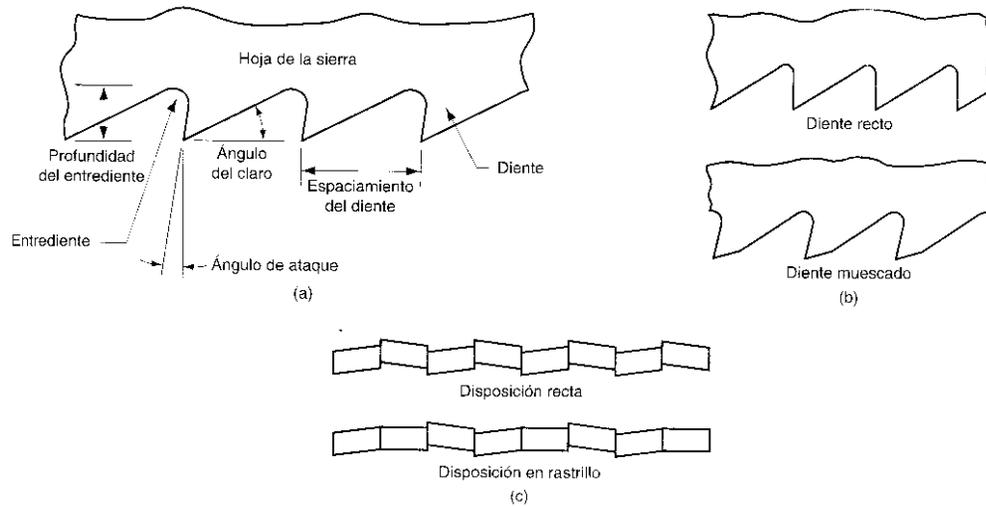


FIGURA 63 Características de las hojas de sierra: (a) nomenclatura para la geometría de las hojas de sierra, (b) dos formas comunes de dientes y (c) dos tipos de disposición de los dientes.

ESMERILADO Y OTROS PROCESOS ABRASIVOS

El maquinado abrasivo implica la eliminación de material por la acción de partículas abrasivas duras que están por lo general pegadas a una rueda. El esmerilado es el proceso abrasivo más importante. El esmerilado, en términos de número de máquinas herramienta en uso, es el más común de todas las operaciones de trabajo de metales.

El rectificando, pulimentado, súper acabado, pulido y abrillantado son otros procesos abrasivos. Los procesos de maquinado abrasivo se usan como operaciones de acabado, aunque algunos de ellos son capaces de altas velocidades de remoción de material que rivalizan con las operaciones de maquinado convencional.

El uso de abrasivos para dar forma a las partes de trabajo es probablemente el proceso más antiguo de remoción de material. Las razones por las que los procesos abrasivos son importantes comercial y tecnológicamente en la actualidad, son las siguientes:

- Se pueden usar en todos los tipos de materiales, desde metales blandos hasta aceros endurecidos, y en materiales no metálicos como cerámicas y silicio.
- Algunos de estos procesos se pueden usar para producir acabados superficiales extremadamente finos de hasta 0,025 μm .
- Para ciertos procesos abrasivos, las dimensiones pueden mantener tolerancias extremadamente pequeñas.

Algunos otros procesos de remoción de material se clasifican también dentro del maquinado abrasivo, debido a que realizan el corte por medios abrasivos, como el corte con chorro de agua abrasiva y el maquinado ultrasónico. Sin embargo, estos procesos se conocen comúnmente como procesos no tradicionales de remoción de material.

1. ESMERILADO

El esmerilado es un proceso de remoción de material en el cual las partículas abrasivas están contenidas en una rueda de esmeril aglutinado que opera a velocidades superficiales muy altas. La rueda de esmeril tiene por lo general forma de disco balanceado con toda precisión para soportar altas velocidades de rotación.

El esmerilado es similar al fresado. En ambas técnicas, el corte ocurre en la periferia o en el frente de la rueda de esmeril, similar al fresado periférico y al fresado de frente. El esmerilado periférico es mucho más común que el esmerilado de frente. La rueda rotatoria de esmeril consiste en muchos dientes cortantes (partículas abrasivas) y el trabajo avanza hacia esta rueda para lograr la remoción del material. A pesar de las similitudes, hay una diferencia significativa entre el esmerilado y el fresado:

1. los granos abrasivos en la rueda son mucho más pequeños y numerosos que los dientes de una fresa,
2. las velocidades de corte en el esmerilado son mucho más altas que el fresado,
3. los granos abrasivos en una rueda de esmeril están orientados aleatoriamente y tienen un ángulo de inclinación promedio muy alto,
4. una rueda de esmeril es autoafilable al desgastarse la rueda, las partículas abrasivas pierde el filo y se fracturan para crear nuevos bordes cortantes, o se eliminan de la superficie de la rueda para dejar expuestos nuevos granos.

1.1. La rueda de esmeril

Una rueda de esmeril consiste en partículas abrasivas y material aglutinante. Los materiales aglutinantes mantienen a las partículas en su lugar y establecen la forma y la estructura de la rueda. Estos dos ingredientes y la forma en que se fabrican, determinan los parámetros de la rueda de esmeril, que son los siguientes:

1. material abrasivo,
2. tamaño del grano,
3. material aglutinante,
4. grado de la rueda y
5. estructura de la rueda.

Éstos son análogos al material y geometría de las herramientas de corte convencionales. Para lograr el desempeño deseado en una aplicación dada, debe seleccionarse cada parámetro cuidadosamente.

Material abrasivo. Los diferentes materiales abrasivos se adecuan para esmerilar diferentes materiales de trabajo. Las propiedades generales de un material abrasivo para las ruedas de esmeril incluyen alta dureza, resistencia al desgaste, tenacidad y fragilidad.

La dureza, la resistencia y la tenacidad son propiedades convenientes para cualquier material de herramienta de corte. La *fragilidad (friability)* se refiere a la capacidad del material abrasivo a fracturarse cuando el filo cortante del grano se desgasta, exponiendo así un nuevo filo de corte. A continuación se describen los materiales abrasivos de mayor importancia comercial en la actualidad, y sus valores relativos de dureza se presentan en la tabla 1:

Óxido de aluminio (Al₂O₃). Éste es el material abrasivo más común. Se usa para esmerilar acero y otras aleaciones ferrosas de alta resistencia.

Carburo de silicio (SiC). El carburo de silicio es más duro que el óxido de aluminio, pero no tan tenaz; sus aplicaciones en esmerilado incluyen metales dúctiles como el aluminio, el latón y el acero inoxidable, así como materiales frágiles como algunas fundiciones de hierro y ciertos cerámicas.

Nitruro de boro cúbico (CBN). Cuando se usa como abrasivo, el nitruro de boro cúbico se produce bajo el nombre comercial de Borazon por la General Electric Company. Las ruedas de esmeril de Borazon se usan para materiales duros como aceros de herramienta endurecidos y aleaciones aeroespaciales.

Diamante. Los abrasivos de diamante se dan en forma natural y también pueden hacerse sintéticamente. Las ruedas de diamante se usan generalmente en aplicaciones de esmerilado de materiales abrasivos duros como cerámicas, carburos cementados y vidrio.

Material abrasivo	Dureza Knoop
óxido de aluminio	2100
Carburo de silicio	2500
Nitruro de boro cúbico	5000
Diamante (artificial)	7000

TABLA 1. Valores de dureza de los materiales abrasivos para ruedas de esmeril.

Tamaño de los granos. El tamaño de los granos de las partículas abrasivas es un parámetro importante en la determinación del acabado superficial y de la velocidad de remoción del material. El tamaño de grano pequeño produce mejores acabados, mientras que los mayores tamaños de grano permiten velocidades de remoción de material más grandes.

Por lo tanto, cuando se selecciona el tamaño de granos abrasivos, deben tenerse en cuenta ambos parámetros. La selección del tamaño de grano depende también hasta cierto punto del tipo de material de trabajo. Los materiales de trabajo más duros requieren tamaño de grano más pequeño para un corte efectivo, mientras que los materiales más blandos requieren tamaños de granos más grandes.

El tamaño de grano se mide por el procedimiento de cribas y mallas. En este procedimiento los tamaños de grano más pequeños tienen números más grandes y viceversa.

El tamaño de los granos usados en las ruedas de esmeril fluctúan típicamente entre 8 y 250. El grano tamaño ocho es muy grueso y el tamaño 250 es muy fino. Se usan los tamaños de grano más finos para pulimentado y súper acabado.

Materiales aglutinantes. Los materiales aglutinantes sujetan los granos abrasivos y establecen la forma y la integridad estructural de la rueda de esmeril. Las propiedades convenientes del material aglutinante son: resistencia, tenacidad, dureza y resistencia a la temperatura.

El material aglutinante debe ser capaz de soportar las fuerzas centrífugas y las altas temperaturas experimentadas por la rueda de esmeril, resistir sin quebrarse ante los impactos de la rueda, también deben sostener los granos abrasivos rígidamente en su lugar para alcanzar la acción de corte y permitir el desalojo de los granos gastados, de manera que se expongan nuevos granos.

Los materiales aglutinantes comunes usados en las ruedas de esmeril incluyen los siguientes:

Aglutinantes vitrificados. Los materiales aglutinantes vitrificados consisten principalmente en arcilla cocida y materiales cerámicas. La mayoría de las ruedas de esmeril de uso común son ruedas con aglutinantes vitrificados, fuertes y rígidas, resistentes a las temperaturas elevadas y casi no se afectan con el agua y los aceites que puedan usarse en los fluidos de esmerilado.

Aglutinante de silicato. Este material aglutinante consiste en silicato de sodio (Na_2SiO_3). Sus aplicaciones se limitan generalmente a situaciones en las que se debe minimizar la generación de calor, como en el esmerilado de herramientas de corte.

Aglutinante de caucho. El caucho es el más flexible de los materiales aglutinantes. Se usa como material aglutinante en las ruedas de corte.

Aglutinante de resina. Este aglutinante se hace de varias resinas termo fijas, como fenol formaldehído. Tienen una gran resistencia y se usan para esmerilado de desbaste y operaciones de corte o separación.

Aglutinante de laca. Las ruedas de esmeril aglutinadas con laca son relativamente fuertes pero no rígidas. Se usan frecuentemente en aplicaciones que requieren un buen acabado.

Aglutinante metálico. Los aglutinantes metálicos, bronce por lo general, son los materiales aglutinantes más comunes para ruedas de diamante y de nitruro de boro cúbico. Se usan técnicas de procesamiento de partículas para aglutinar la matriz de los granos abrasivos, en los cuales se pega el material únicamente en la periferia de la rueda, y de esta forma se conservan los materiales abrasivos costosos.

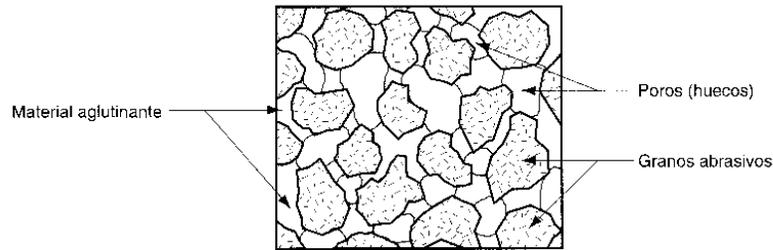


FIGURA 1. Estructura típica de una rueda de esmeril.

Estructura de la rueda y grado de la rueda. La *estructura de la rueda* se refiere al espaciamiento relativo de los granos abrasivos en la rueda. Además de los granos abrasivos y el material aglutinante, las ruedas de esmeril contienen huecos de aire o poros, como se ilustra en la fig. 1. Las proporciones volumétricas de los granos, el material aglutinante y los poros se puede expresar como:

$$Vg + Vb + Vp = 1 \quad (1)$$

donde Vg = proporción de los granos abrasivos en el volumen total de la rueda, Vb = proporción del material aglutinante y Vp = proporción de los poros (huecos).

La estructura de la rueda se mide en una escala que va de abierta a densa. Una estructura abierta es aquella en la que Vp es relativamente grande y Vg es relativamente pequeña. Esto es, hay muchos poros y pocos granos por unidad de volumen en una rueda de estructura abierta. Por el contrario, en una estructura densa Vp es relativamente pequeña y Vg es más grande.

Generalmente se recomiendan estructuras abiertas en situaciones donde se deben proveer claros para la viruta. Las estructuras densas se usan para obtener mejores acabados superficiales y control dimensional.

El grado de la rueda indica la resistencia del aglutinante de la rueda de esmeril para retener los granos abrasivos durante el corte. Esto depende en gran medida de la cantidad de material aglutinante presente en la estructura de la rueda, Vb en la ecuación (1). El grado se mide en una escala que va de blando a duro.

Las ruedas blandas pierden los granos fácilmente, mientras que las ruedas duras retienen los granos abrasivos. Las ruedas blandas se usan generalmente para aplicaciones que requieren una baja velocidad de remoción de material y en el esmerilado de materiales duros. Las ruedas duras se usan típicamente para lograr altas velocidades de remoción de material y ocasionalmente para el esmerilado de materiales blandos.

Especificación de las ruedas de esmeril. Los parámetros precedentes se pueden designar concisamente usando un sistema de especificación de ruedas de esmeril definido por la American National Standards Institute (ANSI).

Este sistema de especificación usa números y letras para identificar el tipo de abrasivo, el tamaño del grano, el grado, la estructura y el material aglutinante. La fig. 2 presenta una versión abreviada de la norma ANSI que indica cómo se interpretan los números y las letras. La norma también proporciona identificaciones adicionales que pueden utilizar los fabricantes de ruedas de esmeril.

La norma ANSI para las ruedas de nitruro de boro cúbico son ligeramente diferentes que las de las ruedas convencionales. El sistema de especificación para estas nuevas ruedas abrasivas se presenta en la fig. 3.

Las ruedas de esmeril vienen en una variedad de formas y tamaños, como se puede ver en la figura 26.4. Las configuraciones (a), (b) y (c) en la figura son ruedas abrasivas periféricas, en las cuales la remoción de material se realiza por la circunferencia exterior de la rueda. Una rueda de corte típica se muestra en la parte (d), que involucra también el corte periférico. Las ruedas (e), (f) y (g) son ruedas de esmerilado de frente, en las cuales la cara plana de la rueda remueve el material de la superficie de trabajo.

Prefijo	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Grado	Estructura	Tipo de aglutinante	Registro del fabricante
30	A	46	H	6	v	xx

Prefijo = Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional)

Tipo de abrasivo:

A = óxido de aluminio

C = Carburo de silicio, etc.

Tamaño del grano:

Burdo = tamaños de grano 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24

Mediano = tamaños de grano 30, 36, 46, 54, 60

Fino = tamaños de grano 70, 80, ..., 180

Muy fino = tamaños de grano 220, 240, ..., 600

Grado: La escala va de la A hasta la Z: A = blando, M = mediano, Z = duro.

Estructura: Escala numérica: 1 = estructura muy densa, 15 = estructura muy abierta.

Tipo de aglutinante: B = resinoso, E = laca, R = caucho, S = silicato, V = vitrificado.

Registro del fabricante: Marca privada de identificación de la rueda (opcional)

FIGURA 2. Sistema de identificación para ruedas de esmeril convencionales definido por la norma ANSI B74.13-1977.

Prefijo	Tipo de abrasivo	Tamaño de grano	Grado	Concentración	Tipo de aglutinante	Modificación Del aglutinante	Profundidad Del abrasivo
xx	D	150	P	YY	M	ZZ	1/8

Prefijo = Símbolo del fabricante para el abrasivo (opcional)

Tipo de abrasivo: D = Diamante, B = Nitruro de boro cúbico

Tamaño de grano:

Burdo = tamaños de grano 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24

Mediano = tamaños de grano 30, 36, 46, 54, 60

Fino = tamaños de grano 70, 80, ..., 180

Muy fino = tamaños de grano 220, 240, ..., 600

Grado: La escala va de la A hasta la Z = blando, M = mediano, Z = duro.

Concentración: Designación del fabricante, puede ser un número o símbolo.

Tipo de aglutinante: B = Resina, M = Metal, V = Vitrificado.

Modificación del aglutinante = Nota del fabricante sobre la modificación o tipo de aglutinante especial.

Profundidad del abrasivo = Profundidad de trabajo de la sección abrasiva en mm.

FIGURA 3. Sistema de identificación para ruedas abrasivas de diamante y nitruro de boro cúbico definido por la norma B74.13-1977.

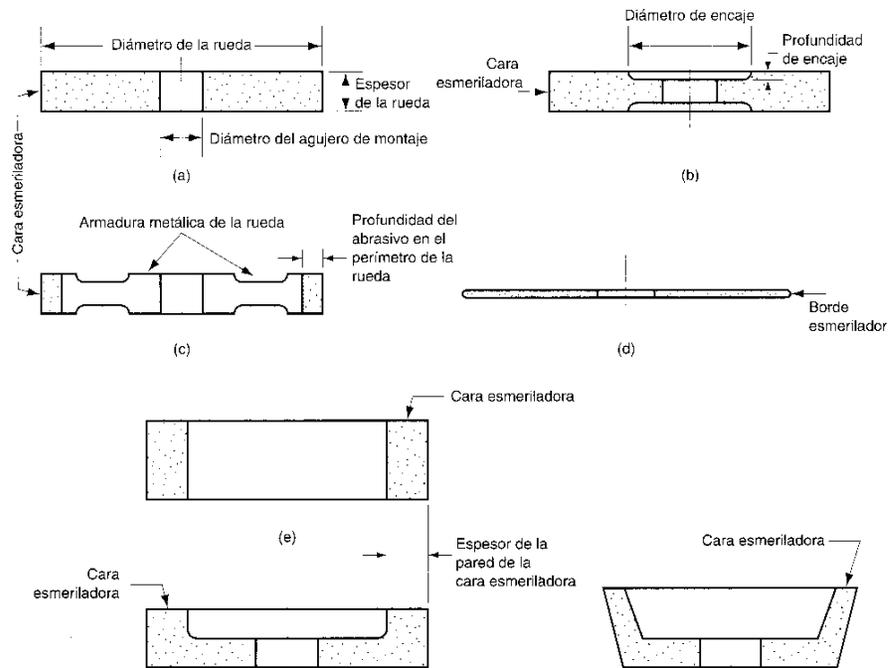


FIGURA 4. Algunas formas estándar de ruedas abrasivas: (a) recta, (b) escotada dos lados, (c) rueda con armadura metálica y abrasivo pegado en la circunferencia, (d) disco abrasivo de corte, (e) rueda cilíndrica, rueda de copa recta y (g) rueda de copa abocinada.

1.2. Análisis del proceso de esmerilado

Las condiciones de corte en el esmerilado se caracterizan por velocidades muy altas y cortes muy pequeños, comparados con el fresado y otras operaciones de maquinado tradicional. Usando el esmerilado superficial de la fig. 5(a) para ilustrar las características principales del proceso, la velocidad periférico de la rueda de esmeril se determina por la velocidad de rotación de la rueda:

$$v = \pi \cdot D \cdot N \quad (2)$$

donde v = velocidad superficial de la rueda, en m/min; N = velocidad del husillo, rev/min; D = diámetro de la rueda, en m. La profundidad del corte d , llamada *avance radial*, es la penetración de la rueda dentro de la superficie original de la pieza. Al proseguir la operación, la rueda de esmeril avanza lateralmente a través de la superficie en cada paso del trabajo.

Esto se llama *avance transversal* y determina el ancho de la trayectoria del esmerilado w en la fig.5(a). Este ancho, multiplicado por la profundidad d , determina el área de la sección transversal de corte.

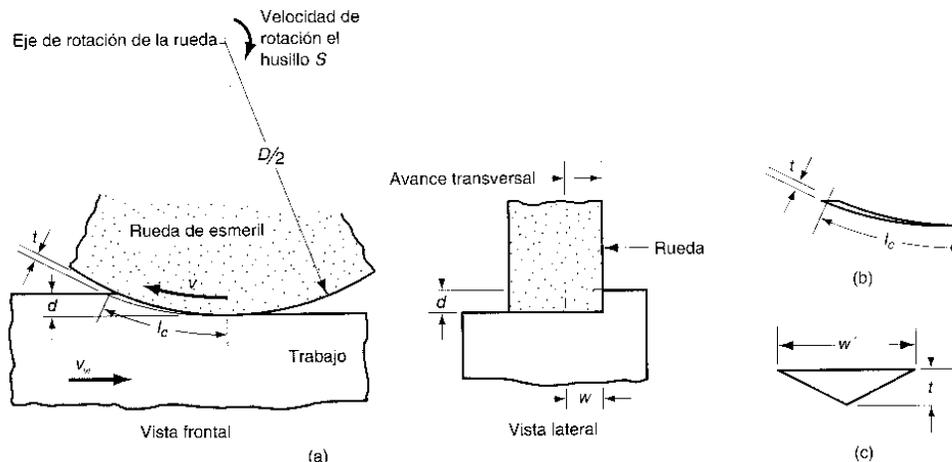


FIGURA 5 (a). Geometría de la superficie esmeriladora mostrando las condiciones de corte; (b) forma longitudinal asumida y (c) sección recta de una viruta simple.

En la mayoría de las operaciones de esmerilado, la pieza se mueve contra la rueda a una cierta velocidad v_w de manera que la velocidad de remoción de material MRR es:

$$MRR = v_w \cdot w \cdot d \quad (3)$$

Cada grano de la rueda de esmeril corta una viruta individual, cuya forma antes del corte se muestra en la fig. 5(c). En el punto de salida del grano con respecto a la pieza, donde la sección transversal de la viruta es mayor, este triángulo tiene una altura t y un ancho w' .

En una operación de esmerilado, nos interesa cómo se combinan las condiciones de corte con los parámetros de la rueda de esmeril que afectan lo siguiente: 1) acabado superficial, 2) fuerzas y energía, 3) temperatura de la superficie de trabajo, 4) desgaste de la rueda.

Acabado superficial. La mayor parte del esmerilado comercial se ejecuta para alcanzar acabados superficiales superiores a los que se pueden alcanzar con maquinado convencional. El acabado de la pieza se afecta por el tamaño de las virutas individuales que se forman durante el esmerilado. Un factor obvio en la determinación del tamaño de viruta es el tamaño del grano, los tamaños más pequeños de grano o partículas rinden mejores acabados.

Examinemos las dimensiones de una viruta individual. A partir de la geometría del proceso de esmerilado en la fig. 5, se puede ver que la longitud promedio de una viruta está determinada por

$$l_c = (D \cdot d)^{1/2} \quad (4)$$

donde l , es la longitud de la viruta, en mm, D = diámetro de la rueda, en mm, y d = profundidad de corte o avance radial, en mm. Se asume que la viruta la forma un grano que actúa a través del arco barrido entero en el diagrama.

La figura 5 (c) muestra la sección transversal que se asume de una viruta en esmerilado. La forma de la sección transversal es triangular con un ancho w' , y es más grande que el espesor t , debido a un factor llamado relación de aspecto del grano r_g definido por

$$r_g = w' / t \quad (5)$$

Los valores típicos del aspecto del grano están entre 10 y 20. El número de granos o partículas activas (dientes cortantes) por mm^2 en la periferia de la rueda de esmeril se denota por C , cuyo valor es normalmente inversamente proporcional al tamaño del grano. C se relaciona también con la estructura de la rueda. Una estructura más densa significa más granos por área. Basado en el valor de C , el número de virutas formadas por tiempo n , está determinado por

$$n_c = v \cdot w \cdot C \quad (6)$$

donde v = velocidad de la rueda, (mm/min); w = avance transversal, (mm), y C = granos x área en la superficie de la rueda de esmeril, (granos/ mm^2). Se da por entendido que el acabado superficial mejorará al aumentar el número de virutas formadas por unidad de tiempo, sobre la superficie de la pieza para un ancho dado w . Por lo tanto, de acuerdo a la ecuación 6, al incrementar v o C se mejorará el acabado. Como se indica, tamaños de grano más pequeños rinden valores de C más grandes.

Fuerzas y energía. Si se conociera la fuerza requerida para conducir el trabajo por enfrente de las ruedas de esmeril, la energía específica en el esmerilado podría determinarse como:

$$U = F_c \cdot v / v_w \cdot w \cdot d \quad (7)$$

donde U = energía específica, (J/mm^3); F_c = la fuerza de corte necesaria para mover la pieza contra la rueda, (N); v = velocidad de la rueda, (m/min); v_w = velocidad de la pieza, (mm/min); w = ancho del corte, (mm); d = profundidad de corte, (mm).

En el esmerilado, la energía específica es mucho más grande que en el maquinado convencional. Hay varias razones para esto.

La primera es el efecto del tamaño en maquinado. Como se analizó previamente, el espesor de la viruta en el esmerilado es mucho más pequeño que para otras operaciones de maquinado como el fresado. De acuerdo a este efecto de tamaño, los tamaños más pequeños de viruta en el esmerilado ocasionan que la energía requerida para remover cada unidad de volumen de material sea aproximadamente diez veces más alta que en el maquinado convencional.

Segundo, los granos individuales en una rueda de esmeril tienen ángulos de inclinación extremadamente negativos. El ángulo de inclinación promedio es aproximadamente -30° , con valores de algunos granos individuales hasta -60° (según se cree). Estos ángulos de inclinación muy bajos rinden valores bajos del ángulo del plano de corte y altas deformaciones cortantes, lo anterior significa niveles de energía más altos en esmerilado.

La tercera razón por la cual la energía específica es más alta en esmerilado es porque no todos las partículas individuales se involucran en el corte real. Debido a su posición aleatoria y a las orientaciones de los granos en la rueda, algunos granos no se proyectan lo suficiente dentro de la superficie de trabajo para realizar el corte. Se pueden reconocer tres tipos de acciones de los granos, según se ilustra en la fig. 6:

1. *corte*, en el cual los granos se proyectan bastante dentro de la superficie para formar una viruta y remover el material;
2. *roturado* en el cual el grano se proyecta dentro del trabajo, pero no lo suficiente para causar corte; en su lugar, la superficie del trabajo se deforma y la energía se consume sin ninguna remoción de material;
3. *roce*, en el cual el grano toca la superficie durante su recorrido, pero solamente ocurre fricción de roce, la cual consume energía sin remover ningún material.

El efecto del tamaño, los ángulos de inclinación negativa y las acciones inefectivas de los granos se combinan para causar que los procesos de esmerilado sean muy ineficientes en términos de consumo de energía por volumen de material removido.

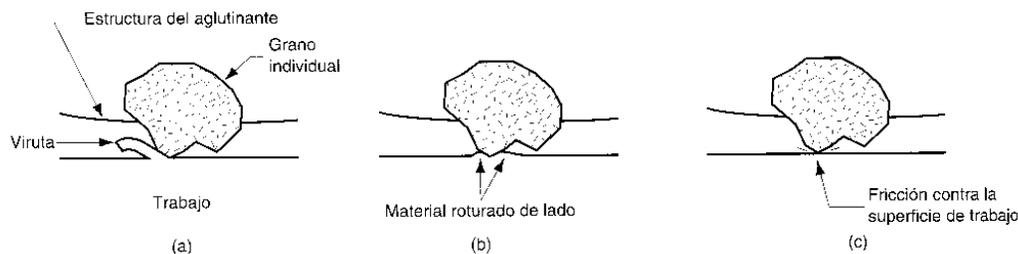


FIGURA 6. Tres tipos de acción de los granos en esmerilado: (a) corte, (b) roturado, depresión deformada localizada, y (c) roce.

Si usamos las relaciones de energía específica precedentes, ecuación 7 y suponemos que las fuerzas de corte que actúan en un grano sencillo en la rueda de esmeril es proporcional a rgt , se puede demostrar que donde F'_c es la fuerza de corte que actúa sobre el grano individual, K_i es una constante de proporcionalidad que depende de la resistencia del material que se corta y de la agudeza de los granos individuales, los otros términos se definieron previamente.

$$F'_c = K_1 \left(r_g \cdot v_w / v \cdot C \right)^{0.5} \left(d/D \right)^{0.25} \quad (8)$$

La significación práctica de esta relación es que F'_c , afecte o no a los granos individuales, tirará hacia afuera de la rueda de esmeril, factor importante en la capacidad de la rueda para reafilarse a sí misma.

Refiriéndonos a nuestro análisis del grado de la rueda, se puede hacer que una rueda dura aparezca más blanda al incrementar la fuerza de corte que actúa sobre los granos individuales a través de ajustes apropiados en v_w , v y d , de acuerdo con la ecuación (8).

Temperaturas en la superficie de trabajo. Debido al efecto de tamaño, los ángulos de inclinación altamente negativos, el roturado y el roce de los granos abrasivos contra la superficie del grano, el proceso de esmerilado se caracteriza por altas temperaturas y alta fricción.

Al contrario de las operaciones convencionales de maquinado en las cuales la mayor parte de la energía calorífica generada en el proceso se va en la viruta, la mayor parte de la energía en el esmerilado permanece en la superficie esmerilada y provoca altas temperaturas de la superficie de trabajo. Las altas temperaturas superficiales pueden tener varios efectos dañinos posibles.

Probablemente el mayor daño de la superficie sean las quemaduras y las grietas. Las marcas de quemaduras aparecen como decoloraciones de la superficie debidas a la oxidación. Las quemaduras por esmerilado son frecuentemente un signo de daño metalúrgico inmediatamente debajo de la superficie. Las grietas superficiales son perpendiculares a la dirección de la velocidad de la rueda. Éstas indican un caso extremo de daño térmico en la superficie de trabajo.

Un segundo efecto térmico perjudicial es el ablandamiento de la superficie de trabajo. Muchas operaciones de esmerilado se llevan a cabo sobre partes que han sido tratadas térmicamente para obtener alta dureza. Las altas temperaturas de esmerilado pueden hacer que la superficie pierda algo de su dureza. El tercer efecto térmico en el esmerilado puede causar esfuerzos residuales en la superficie de trabajo y posible decrecimiento en la resistencia a la fatiga de la parte.

Es importante entender qué factores tienen influencia en la temperatura de la superficie de trabajo en el esmerilado. Se ha observado experimentalmente que la temperatura superficial depende de la energía por área superficial esmerilado (relacionada estrechamente con la energía específica U). Como ésta varía inversamente al espesor de la viruta, se puede demostrar que la temperatura superficial T_s , se relaciona con los parámetros del esmerilado de la siguiente manera:

$$T_s = K_2 \cdot d^{0.75} \frac{(r_g \cdot C v)^{0.5}}{V_w} \cdot D^{0.25} \quad (9)$$

donde K_2 = una constante de proporcionalidad. La implicación práctica de esta relación es que el daño superficial debido a la alta temperatura del trabajo puede mitigarse al disminuir la profundidad de corte d , la velocidad de la rueda v y el número de partículas activas por pulgada cuadrada en la rueda de esmeril C , o al incrementar la velocidad de trabajo V_w .

Además, las ruedas de esmeril desgastadas y las ruedas que tienen alto grado y estructura densa, tienden a causar problemas térmicos. Las temperaturas de esmerilado también se pueden reducir usando un fluido para corte.

Desgaste de la rueda. Las ruedas de esmeril se desgastan como cualquier herramienta de corte convencional. Se reconocen tres mecanismos como las causas principales de desgaste en las ruedas de esmeril:

- 1) fractura de granos,
- 2) desgaste por rozamiento y
- 3) fractura por el aglutinante.

La fractura del grano: ocurre cuando una porción de los granos se rompe, pero el resto permanece aglutinado en la rueda. Los bordes del área fracturada se convierten en nuevos filos de corte en la rueda de esmeril. La tendencia del grano a la fractura se denomina fragilidad (*friability* en inglés). Una alta fragilidad significa que los granos se fracturan más rápidamente debido a las fuerzas de corte en los granos F^c .

El desgaste por rozamiento: involucra el desgaste de los granos individuales que dan como resultado zonas planas y bordes redondeados. Este tipo de desgaste es análogo al desgaste de una herramienta de corte convencional. Se debe a mecanismos físicos similares, incluyendo la fricción y la difusión, así como las reacciones químicas que se originan entre el material abrasivo y el de trabajo en presencia de temperaturas muy altas.

La fractura por el aglutinante: sucede cuando los granos individuales son expulsados del material aglutinante. La tendencia hacia este mecanismo depende del grado de la rueda, entre otros factores. La fractura del aglutinante ocurre generalmente porque el grano se ha deslustrado, debido al desgaste por roce, y la fuerza resultante del corte es excesiva. Los granos afilados cortan más efectivamente con fuerzas de corte más bajas, por lo tanto, éstos permanecen fijos en la estructura del aglutinante.

Los tres mecanismos se combinan para ocasionar que la rueda de esmeril se desgaste, como se describe en la fig. 7. Se pueden identificar tres regiones de desgaste:

En la primera región, los granos son agudos inicialmente y el desgaste se acelera debido a la fractura de los granos. Éste corresponde al periodo de irrupción en el desgaste convencional de la herramienta.

En la segunda región, la velocidad de desgaste es más o menos constante y provoca una relación lineal entre la rueda de esmeril y el volumen de metal removido. La característica principal de esta región es el desgaste por rozamiento, con algo de fractura de granos y de aglutinante.

En la tercera sección de la curva de desgaste de la rueda, los granos se vuelven lisos, y la magnitud de la depresión localizado deformada y del rozamiento o fricción se incrementan en relación con el corte. Además, algo de viruta se queda atrapada en los poros de la rueda.

A esto se le llama *saturación* o carga de la rueda, dicho efecto impide la acción de corte y conduce a un mayor calentamiento y a temperaturas superficiales de trabajo. Como consecuencia, la eficiencia del esmerilado decrece y el volumen de la rueda removida aumenta en relación con el volumen del metal removido.

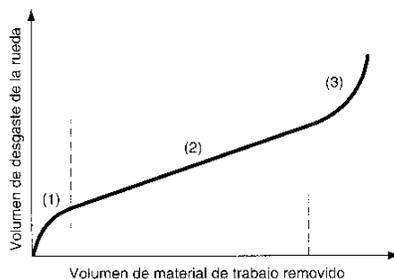


FIGURA 7. Curva de desgaste típica de una rueda de esmeril. El desgaste se grafica convenientemente en función del volumen de material removido, en lugar de hacerlo en función del tiempo.

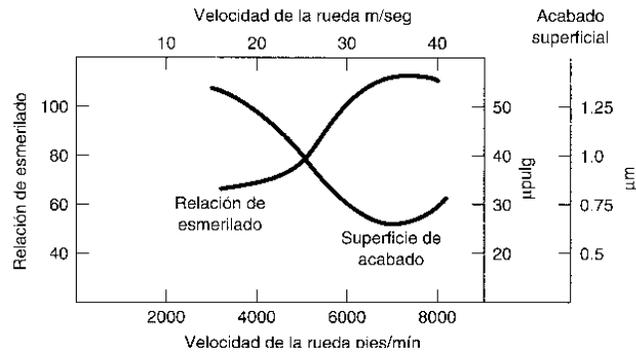


FIGURA 8. Relación de esmerilado y acabado superficial en función de la velocidad. Basada en datos de Krabacher.

La relación de esmerilado es un término usado para indicar la pendiente de la curva de desgaste de la rueda. Específicamente,

$$GR = \frac{V_w}{V_g} \quad (10)$$

donde GR = relación de esmerilado, V_w = volumen de material de trabajo removido y V_g = volumen correspondiente de la rueda de esmeril que se gasta durante el proceso. El radio de esmerilado tiene la mayor significancia en la región de desgaste lineal de la fig. 7.

Los valores típicos de GR fluctúan entre 95 y 125, lo cual significa es cerca de cinco órdenes de magnitud menos que la relación análoga en maquinado convencional. La relación de esmerilado se incrementa cuando aumenta la velocidad de la rueda v .

La razón es que el tamaño de la viruta formada por cada grano es más pequeño a velocidades más altas, así que la cantidad de fracturas de grano se reduce. Como las velocidades más altas de la rueda mejoran también el acabado superficial, hay una ventaja general al operar a altas velocidades de esmerilado.

Sin embargo, cuando las velocidades se incrementan demasiado, aumenta el desgaste por frotación y la temperatura. Como resultado, la relación de esmerilado se reduce y el acabado de la superficie se perjudica. Este efecto fue reportado originalmente por Krabacher, como se muestra en la fig. 8.

Cuando la rueda está en la tercera región de la curva de desgaste, debe reafilarse por un procedimiento llamado *acabado* (*perforación mecánica*, *dressing* en inglés), que consiste en:

- 1) romper los granos desgastados en la periferia exterior de la rueda de esmeril a fin de exponer granos afilados frescos y
- 2) remover las virutas que se han quedado atrapadas en la rueda.

Esto se logra por medio de un disco rotatorio, una barra abrasiva, u otra rueda de esmeril operando a alta velocidad, sostenida contra la rueda que se viste cuando está girando. Aunque el dressing afila la rueda, no garantiza la forma de la rueda.

El *rectificado* (*truing*, en inglés) es un procedimiento alternativo que no solamente afila la rueda, sino que también restaura su forma cilíndrica y asegura la rectitud de su perímetro exterior. El procedimiento implica el uso de una herramienta de punta de diamante (se pueden usar también otros tipos de herramienta para corregir o rectificar) que avanza lentamente y con precisión a través de la rueda conforme ésta gira. Esto toma una profundidad muy ligera de la rueda.

1.3. Consideraciones en la aplicación del esmerilado

En esta sección, tratamos de resumir las revisiones previas sobre los parámetros de la rueda y el análisis teórico del esmerilado, así como sus aplicaciones prácticas. También consideramos los fluidos para esmerilado que se usan comúnmente en estos procesos.

Lineamientos de aplicación: Muchas variables en el esmerilado afectan su desempeño y el éxito de la operación. Los siguientes lineamientos son útiles para sortear las complejidades y seleccionar los parámetros apropiados de la rueda y las condiciones de esmerilado:

1. Para optimizar el acabado superficial seleccione una estructura de rueda densa con granos de tamaño pequeño. Use también, velocidades más altas (v) y velocidades de trabajo bajas (v_w). Las profundidades de corte más pequeñas (d) y mayores diámetros de rueda (D) también pueden ayudar algo.
2. Para maximizar la velocidad de remoción de material, seleccione un tamaño grande de partícula, estructura de rueda más abierta y aglutinante vitrificado.
3. Para esmerilar acero y la mayoría de las fundiciones de hierro, seleccione el óxido de aluminio como abrasivo.
4. Para esmerilar la mayoría de los metales no ferrosos, seleccione el carburo de silicio como abrasivo.
5. Para esmerilar aceros de herramienta endurecidos y ciertas aleaciones aeroespaciales elija el nitruro de boro cúbico (Borazon) como abrasivo.
6. Para esmerilar materiales abrasivos duros, como cerámicas, carburos cementados y vidrio, elija el diamante como abrasivo.
7. Para metales blandos, escoja un tamaño grande de grano y el grado de rueda más duro. Para metales duros, elija un tamaño de grano pequeño y un grado más blando de rueda.
8. Para minimizar el daño por calor, el agrietado y el alabeado de la superficie de trabajo mantenga el afilado de la rueda. Labre la rueda frecuentemente. Use también profundidades de corte más ligeras (d), velocidades de rueda más bajas (v), velocidades de trabajo más rápidas (v_w).
9. Si la rueda de esmeril se abriga y se quema, seleccione una rueda de grado más blando y estructura más abierta.
10. Si la rueda de esmeril se rompe demasiado rápido, seleccione una rueda de grado más duro y estructura más densa.

Fluidos de esmerilado: La aplicación apropiada de los fluidos de corte ha sido efectiva para reducir los efectos térmicos y las altas temperaturas superficiales de trabajo descritas previamente. Cuando estos fluidos se usan en la operación de esmerilado, se llaman fluidos de esmerilado, las funciones que desempeñan son similares a las de los fluidos de corte. Dos funciones comunes son reducir la fricción y remover el calor de los procesos. Además, el lavado de las virutas y la reducción de la temperatura de la superficie de trabajo son muy importantes en el esmerilado.

Los tipos de fluidos de esmerilado incluyen en su composición química aceites de esmerilado y aceites emulsionados. Los aceites de esmerilado se derivan del petróleo y otras fuentes. Estos productos parecerían ser atractivos debido a que la fricción es un factor importante en esmerilado. Sin embargo, representan riesgos de incendio y de la salud del operador, su costo es alto en relación con los aceites emulsionados.

Además, su capacidad de eliminar el calor es menor que la de los fluidos basados en agua. Por esto se recomiendan comúnmente las mezclas de aceite en agua como fluidos de esmerilado, cuyas concentraciones son más altas que los aceites emulsionados para corte convencional, de esta forma refuerzan el mecanismo de reducción de la fricción.

1.4. Operaciones de esmerilado y máquinas de esmerilar

Se usa tradicionalmente el esmerilado para partes cuya geometría ha sido creada por otras operaciones. Por consiguiente, se han desarrollado máquinas para esmerilar superficies planas, cilindros exteriores o interiores y contornos como roscas. Los contornos se crean frecuentemente por ruedas de formado especial, que tienen el contorno opuesto al que se desea impartir al trabajo.

El esmerilado se usa también en los cuartos de herramientas para formar la geometría de las herramientas de corte. Además de estos usos tradicionales, las aplicaciones del esmerilado se están expandiendo para incluir operaciones de más alta velocidad y más alta remoción de material.

Nuestra revisión de las operaciones y de las máquinas en esta sección incluyen los siguientes tipos:

- 1) esmerilado superficial,
- 2) esmerilado cilíndrico,
- 3) esmerilado sin centro,
- 4) esmerilado profundo,
- 5) otras operaciones de esmerilado.

Esmerilado superficial: El esmerilado superficial se usa normalmente para esmerilar superficies planas. Se realiza ya sea con la periferia de la rueda de esmeril o con la cara plana de la rueda. Como el trabajo se sostiene normalmente en una orientación horizontal, el esmerilado periférico se ejecuta girando la rueda en un eje horizontal, y el esmerilado de la cara se realiza girando la rueda en un eje vertical.

En cualquier caso, el movimiento relativo de la parte de trabajo se logra con un movimiento de vaivén del trabajo frente a la rueda o haciéndolo girar. Estas posibles combinaciones de las orientaciones de los movimientos de la rueda y de la parte de trabajo producen los siguientes cuatro tipos de máquinas de esmerilado superficial, como se ilustra en la fig. 9:

- (a) husillo horizontal con mesa de trabajo oscilante,
- (b) husillo horizontal con mesa de trabajo rotatoria,
- (e) husillo vertical con mesa de trabajo oscilante y
- (d) husillo vertical con mesa de trabajo rotatoria.

De los cuatro tipos, la (a) de husillo horizontal con mesa oscilante es la máquina más común, la cual se muestra en la fig. 10. El esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo longitudinalmente bajo la rueda a una profundidad muy pequeña (avance normal o radial) y haciendo avanzar la rueda transversalmente dentro del trabajo una cierta distancia entre cada oscilación. En estas operaciones el ancho de la rueda es generalmente menor que el de la pieza de trabajo.

Además de sus aplicaciones convencionales, una máquina de esmerilar con husillo horizontal y mesa oscilante se puede usar para formar superficies con contornos especiales mediante una rueda formada de esmerilado. En lugar de hacer avanzar la rueda transversalmente sobre el trabajo conforme éste oscila, la rueda se *hunde cortando* verticalmente el trabajo. La forma de la rueda se imparte a la superficie del trabajo.

Las máquinas de esmerilar con husillos verticales y mesas oscilantes se montan para que el diámetro de la rueda sea mayor que el ancho del trabajo. En consecuencia, estas operaciones se pueden realizar sin necesidad de usar un movimiento de avance transversal. En su lugar, el esmerilado se realiza haciendo oscilar el trabajo enfrente de la rueda y haciendo avanzar la rueda verticalmente en el trabajo a la dimensión deseada. Esta configuración es capaz de lograr una superficie muy plana en el trabajo.

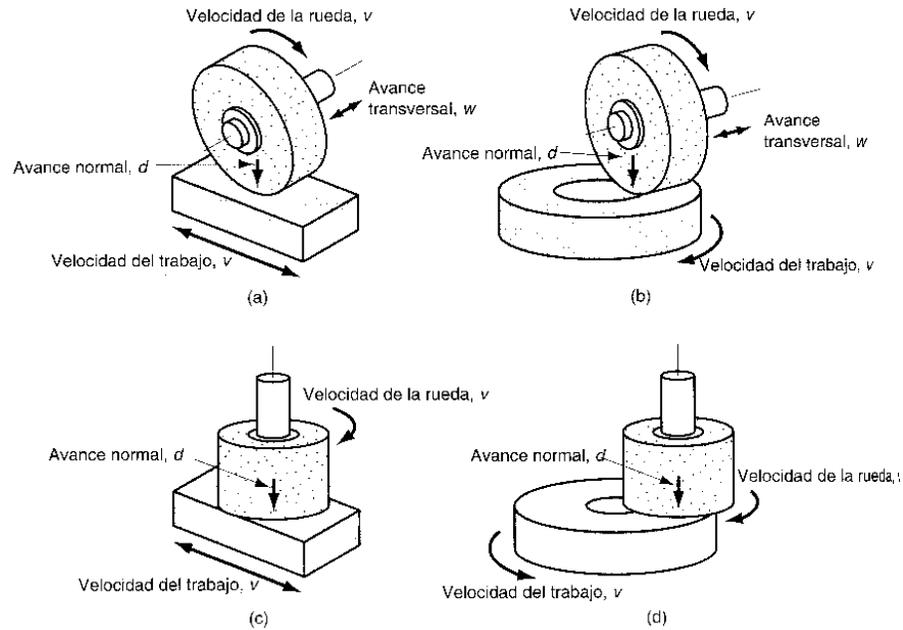


FIGURA 9. Cuatro tipos de esmerilado superficial: (a) husillo horizontal con mesa de trabajo oscilante, (b) husillo horizontal con mesa de trabajo rotatoria, (c) husillo vertical con mesa de trabajo oscilante y (d) husillo vertical con mesa de trabajo rotatoria.

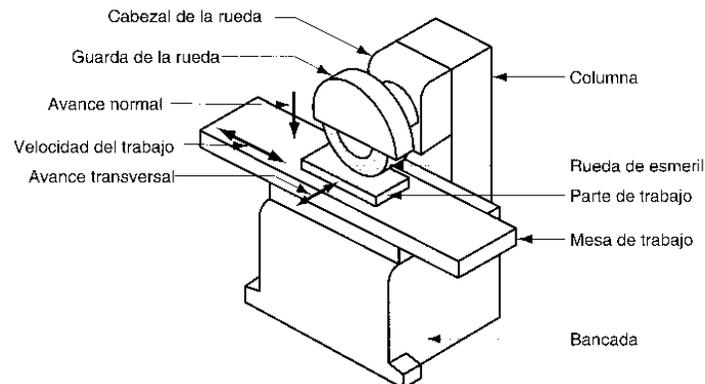


FIGURA 10. Esmeriladora superficial con husillo horizontal y mesa de trabajo oscilante.

De los dos tipos de mesa rotatoria para esmerilado de la fig. 9(b) y (d), las máquinas de husillo vertical son las más comunes. Debido a la superficie de contacto relativamente grande que existe entre la rueda y la parte de trabajo, las máquinas de esmerilado de mesa rotatoria y husillo vertical son capaces de altas velocidades de remoción del metal cuando están equipadas con ruedas de esmeril apropiadas.

Esmerilado cilíndrico: Como su nombre indica, el esmerilado cilíndrico se usa para partes rotacionales. Estas operaciones de esmerilado se dividen en dos tipos básicos, ilustrados en la fig.11: (a) esmerilado cilíndrico externo y (b) esmerilado cilíndrico interno.

El esmerilado cilíndrico externo. (también llamado *esmerilado tipo centro*, para distinguirlo del esmerilado sin centro) se realiza en forma parecida a la operación de torneado. Las máquinas de esmerilado que se usan para estas operaciones se asemejan mucho a un tomo, en el cual el portaherramientas ha sido reemplazado por un motor de alta velocidad para mover la rueda de esmeril.

La pieza de trabajo cilíndrica se hace girar entre los centros para proveer una velocidad superficial de 18 a 30 m/min., y la rueda de esmeril, que gira a 1.200 o 2.000 m/min, se engancha para realizar el corte.

Son posibles dos tipos de movimiento de avance, avance transversal y corte hundido, como se muestra en la fig. 12. En el avance transversal la rueda de esmeril avanza en dirección paralela al eje de rotación de la parte de trabajo.

El avance normal se fija dentro de un rango típico de 0.0076 a 0.076 mm. Algunas veces se le da a la rueda o al trabajo un movimiento oscilante longitudinal para mejorar el acabado superficial. En el corte hundido, la rueda de esmeril avanza radialmente dentro de la pieza. Las ruedas formadoras esmeril usan este tipo de movimientos de avance.

El esmerilado cilíndrico externo se usa para terminar partes que han sido maquinadas al tamaño aproximado y tratadas térmicamente para alcanzar la dureza deseada. Estas partes incluyen ejes, cigüeñales, husillos, rodamientos, bujes y rodillos para molinos laminadores. La operación de esmerilado produce el tamaño final y el acabado superficial requerido en estas partes endurecidas.

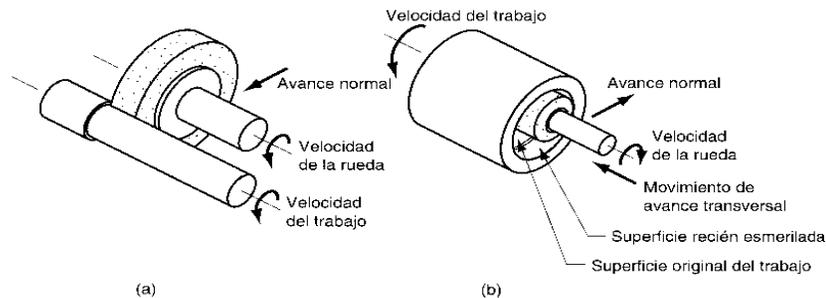


FIGURA 11. Dos tipos de esmerilado cilíndrico: (a) externo y (b) interno.

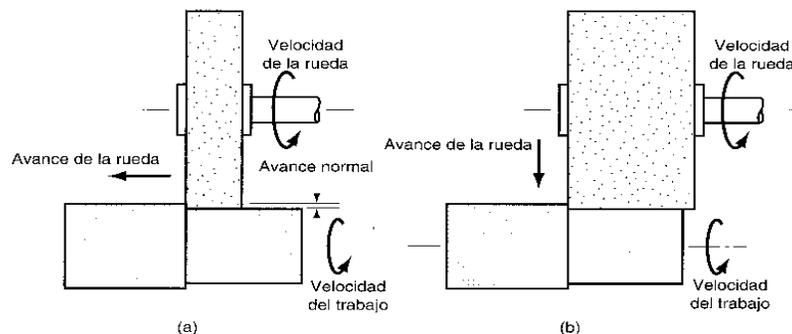


FIGURA 12. Dos tipos de movimientos de avance en esmerilado cilíndrico externo: (a) avance transversal y (b) corte hundido.

El esmerilado cilíndrico interno opera en forma similar a la operación de perforado. La pieza de trabajo se sostiene por lo general en un mandril y se hace girar para obtener velocidades superficiales de 23 a 60 m/min.. Las velocidades superficiales de la rueda son similares a las del esmerilado cilíndrico externo.

La rueda avanza en cualquiera de dos formas:

- 1) avance transversal, que es la más común y se ilustra en la fig. 11(b), y
- 2) avance hundido.

Obviamente, el diámetro de la rueda en el esmerilado cilíndrico interno debe ser más pequeño que el agujero perforado originalmente.

Esto significa frecuentemente que el diámetro de la rueda es muy pequeño y, por lo tanto, se necesitan velocidades de rotación muy altas a fin de lograr la velocidad superficial deseada. El esmerilado interno se usa para terminar superficies internas endurecidas de guías de cojinetes y superficies de bujes.

Esmerilado sin centros: El esmerilado sin centros es un proceso alternativo para esmerilar superficies cilíndricas internas y externas. Como su nombre lo indica, la pieza de trabajo no se sostiene entre los centros, lo cual produce una reducción del tiempo de manejo del trabajo. Por esta causa, el esmerilado sin centros se usa frecuentemente para trabajos de alta producción.

El arreglo para el *esmerilado externo sin centros* se muestra en la fig.13. Se requieren dos ruedas: la rueda de esmeril y una rueda reguladora. Las partes de trabajo -que pueden ser muchas piezas cortas individuales de varios mm de largo, o varias barras largas, por ejemplo de 3,6 m de largo- pueden sostenerse por una cuchilla de apoyo y alimentarse a través de las dos ruedas.

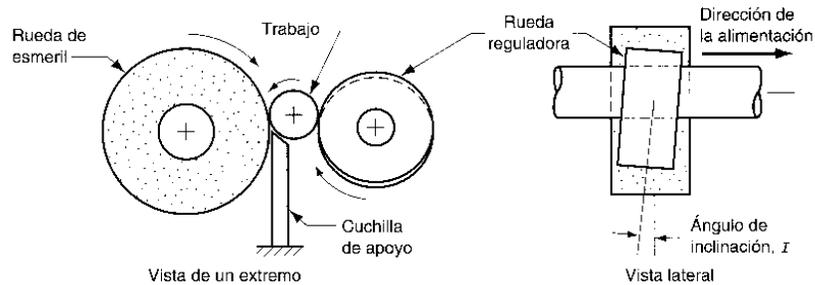


FIGURA 13. Esmerilado extremo sin centros.

La rueda esmeriladora hace el corte girando a una velocidad superficial de 1.200 a 1.800 m/min. La rueda reguladora gira a velocidades mucho más bajas y está inclinada a un ángulo ligero I para controlar la alimentación del trabajo. La siguiente ecuación se puede usar para predecir la velocidad de alimentación, basada en un ángulo de inclinación y en otros parámetros del proceso:

$$f_r = \pi \cdot D_r \cdot N_r \cdot \text{sen} I \quad (11)$$

donde f_r = velocidad de avance, (mm/min); D_r = diámetro de la rueda reguladora, (mm); N_r = velocidad de rotación de la rueda reguladora en rev/min, e I = ángulo de inclinación de la rueda reguladora.

El arreglo típico en *esmerilado interno sin centros* se muestra en la fig.14. En lugar de la cuchilla de apoyo, se usan dos rodillos de soporte para mantener la posición del trabajo. La rueda reguladora se inclina en un pequeño ángulo para controlar el avance del trabajo que pasa enfrente de la rueda de esmeril.

Debido a la necesidad de soportar la rueda de esmeril, no es posible la alimentación del trabajo como en el esmerilado externo sin centro. Por lo tanto, en esta operación de esmerilado no se pueden lograr a las mismas velocidades de alta producción que son posibles en el proceso externo sin centro. Su ventaja es que es capaz de suministrar una concentricidad muy estrecha entre los diámetros interno y externo de una parte tubular, como las guías para rodamientos de rodillos.

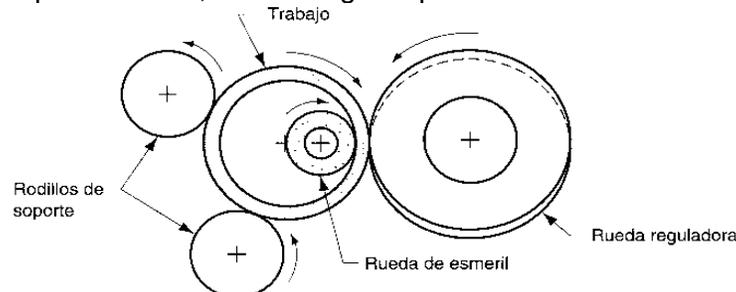


FIGURA 14. Esmerilado interno sin centros.

Esmerilado profundo: Una forma relativamente nueva es el esmerilado profundo (o esmerilado con avance bajo condiciones de termofluencia), desarrollado alrededor de 1958. El esmerilado profundo se ejecuta a profundidades de corte muy altas y a velocidades de avance muy bajas, de aquí el nombre genérico de esmerilado bajo condiciones de termofluencia. La comparación con el esmerilado superficial convencional se ilustra en la fig.15.

Las profundidades de corte en el esmerilado profundo son de 1.000 a 10.000 veces más grandes que en el esmerilado superficial convencional, y las velocidades de avance se reducen alrededor de la misma proporción.

Sin embargo, la remoción del material y la productividad se incrementan debido a que la rueda corta continuamente. Esto contrasta con el esmerilado superficial convencional en el cual el movimiento oscilante del trabajo da como resultado una pérdida significativa de tiempo durante cada carrera.

El esmerilado profundo puede aplicarse en el esmerilado superficial y en el esmerilado cilíndrico externo. Las aplicaciones del esmerilado superficial incluyen el esmerilado de ranuras y perfiles. El proceso parece especialmente apropiado para aquellos casos en los cuales la relación entre profundidad y ancho son relativamente grandes. Las aplicaciones cilíndricas incluyen roscas, perfiles de engranes formados y otros componentes cilíndricos. El término *esmerilado profundo* se usa en Europa para describir las aplicaciones del esmerilado cilíndrico con avance lento.

Se ha despertado un reciente interés en el esmerilado profundo por la introducción de máquinas esmeriladoras diseñadas con características especiales para realizar este proceso. Las características incluyen: alta estabilidad estática y dinámica, correderas muy precisas con una tendencia reducida a atascarse, poder incrementado del husillo (dos a tres veces la potencia de las máquinas de esmerilado convencional), tabla de velocidades para avances lentos, sistemas de manejo de fluidos para esmerilado de alta presión; sistemas capaces de labrar las ruedas de esmerilado durante el proceso. Las ventajas típicas del esmerilado profundo incluyen:

- 1) alta velocidad de remoción de material,
- 2) precisión mejorada para partes formadas y
- 3) temperaturas reducidas de la superficie de trabajo.

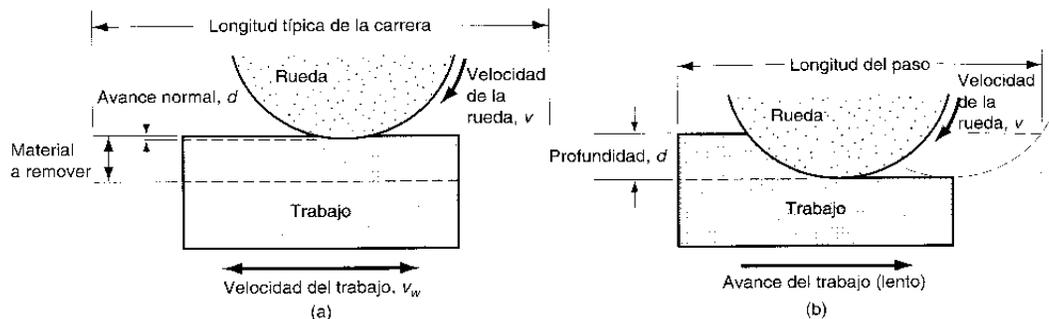


FIGURA 15. Comparación de (a) esmerilado superficial convencional (b) esmerilado profundo.

Otras operaciones de esmerilado. Debemos mencionar otras operaciones de esmerilado para completar nuestra revisión en esta sección. Éstas incluyen el afilado de herramientas, esmeriles de plantillas, esmeriles de discos, bandas abrasivas y rebabado.

Las herramientas de corte están hechas de acero endurecido y otros materiales duros. Los *afiladores de herramientas* son máquinas de esmerilado especial de varios diseños para afilar y reacondicionar las herramientas de corte. Estas máquinas tienen dispositivos que posicionan y orientan las herramientas durante el esmerilado de las superficies deseadas, a los ángulos y radios especificados.

Varios de los afiladores de herramientas son de propósito general, mientras que otros tienen el único propósito de cortar la geometría de tipos específicos de herramienta. Los afiladores de propósito general usan aditamentos especiales y ajustes para acomodar una variedad de herramientas. Los afiladores de propósito único incluyen afiladores de engranes, afiladores de fresas de varios tipos, afiladores de escariadores y afiladores de brocas.

Los esmeriles de plantillas o patrones son máquinas usadas tradicionalmente para esmerilar agujeros de alta precisión en partes de acero endurecido. Las aplicaciones originales incluyen dados troqueladores y herramientas. Aunque estas aplicaciones son todavía importantes, los esmeriles de plantillas se usan actualmente en un rango más amplio, donde se requiere alta precisión y buen acabado de componentes endurecidos. Hay máquinas de esmeriles de plantillas que disponen de control numérico para lograr una operación automatizada.

Los esmeriles de disco son máquinas esmeriladoras con discos grandes montados en ambos extremos de un eje horizontal, como se muestra en la fig.16. El trabajo se mantiene contra las superficie plana de la rueda (en general, manualmente) para realizar la operación de esmerilado. Algunas máquinas esmeriladoras de disco tienen husillos opuestos dobles. Ajustando los discos a la separación deseada, la parte de trabajo puede avanzar automáticamente entre los dos discos y esmerilarse simultáneamente sobre los lados opuestos. Las ventajas del esmerilador de discos son su buena planitud y paralelismo a velocidades altas de producción.

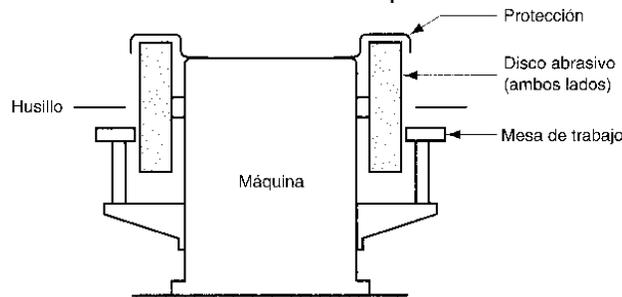


FIGURA 16. Configuración típica de un esmerilador de discos.

La configuración del *rebabador* es similar al esmerilador de disco. La diferencia es que el esmerilado se hace en la periferia de la rueda más que en el lado plano de la rueda. Por lo tanto, el diseño de las ruedas de esmeril es diferente de las del esmerilador de discos. El rebabado es generalmente una operación manual para operaciones de esmerilado de desbaste, tales como remover la rebaba de piezas de fundición, forjado y alisado de las juntas soldadas.

El esmerilado con bandas de abrasivo usa partículas abrasivas pegadas a una banda flexible (tela). El arreglo típico se ilustra en la fig.17. El soporte de la banda se requiere cuando el trabajo se presiona contra ella, este soporte se consigue por medio de un rodillo o placa localizado atrás de la banda. Se usa una placa plana para trabajos que necesiten superficies planas. Se puede usar una placa blanda si se quiere conformar la banda al contorno general de la parte durante el esmerilado. La velocidad de la banda depende del material que se está esmerilando.

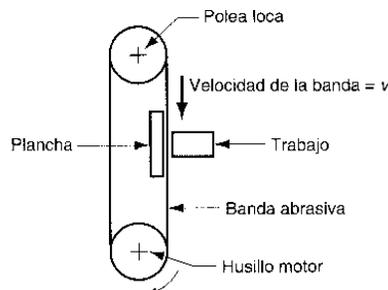


FIGURA 17. Esmerilador de banda abrasiva.

El rango típico es de 750 a 1.700 m/min. Debido a los mejoramientos en los abrasivos y en los materiales aglutinantes, cada vez se usan más bandas abrasivas para altas velocidades de remoción de material, en lugar del esmerilado ligero aplicado tradicionalmente. El término *lijadora* de banda se refiere a las aplicaciones ligeras del esmerilado, en las cuales la parte de trabajo se presiona contra la banda para remover rebabas y salientes, y también para producir un mejor acabado en forma rápida y manual.

2. PROCESOS ABRASIVOS RELACIONADOS

Otros procesos abrasivos incluyen rectificando, pulimentado, superacabado, pulido y abrillantado. Éstos se usan exclusivamente como operaciones de acabado. La forma inicial de la parte se crea por algún otro proceso y se termina por medio de alguna de estas operaciones para obtener un acabado superficial superior.

Las partes geométricas usuales para estos procesos se indican en la tabla 2 y los acabados superficiales típicos se presentan en la fig.18. También se presentan los valores de la rugosidad superficial para el esmerilado.

Proceso	Geometría usual de la pieza
Rectificado fino	Agujero redondo (cilindro de motor de combustión interna)
Lapidado o pulido	Plana o ligeramente esférica (por ejemplo, lente)
Superacabado	Superficie plana, cilíndrica externa
Pulido	Formas misceláneas
Abrillantado	Formas misceláneas

TABLA 2. Geometría usual de las partes para rectificando, pulimentado, superacabado, pulido y abrillantado

Otra clase de operaciones, llamadas acabado en masa, se usan para acabar partes en forma colectiva más que individual. Estos métodos de acabado masivo se usan también para limpieza y rebabado.

2.1. Rectificado fino

El rectificando fino es un proceso abrasivo ejecutado por un conjunto de barras abrasivas pegadas. Una aplicación común es el acabado de perforaciones en máquinas de combustión interna. Otras aplicaciones incluyen rodamientos, cilindros hidráulicos, y cañones de pistolas. En estas aplicaciones se logran acabados superficiales cercanos a 127 μm o ligeramente mejores.

El rectificando produce una superficie característica, que tiende a retener la lubricación durante la operación del componente, contribuyendo a su función y vida de servicio.

El proceso de rectificando para una superficie cilíndrica interna se ilustra en la fig.19. La herramienta de rectificando consiste en un conjunto de barras abrasivas pegadas. Se usan cuatro barras sobre la herramienta que se muestra en la figura, pero su número depende del tamaño del agujero.

Para agujeros pequeños se podrían usar de dos a cuatro barras (cañones de pistola por ejemplo), y para agujeros de diámetro más grande se podrían usar una docena o más.

El movimiento de la herramienta de rectificando es una combinación de rotación y oscilación lineal, regulada de tal manera que un punto dado de la barra abrasiva, no repite la misma trayectoria. Este movimiento más bien complejo produce el patrón sobre la superficie de la perforación. Las velocidades de rectificando fluctúan entre 18 y 150 m/min.

Operación abrasiva	0.5 μpulg 0.0127 μm	1.0 μpulg 0.0254 μm	2.0 μpulg 0.051 μm	4.0 μpulg 0.102 μm	8.0 μpulg 0.203 μm	16 μpulg 0.406 μm	32 μpulg 0.813 μm	63 μpulg 1.60 μm
Esmerilado, granos tamaño mediano								
Esmerilado, granos tamaño fino								
Rectificado fino								
Lapeado								
Supercabado								
Pulido								
Abrillantado								

FIGURA 18. Valores (AA) de rugosidad superficial logrados en los procesos abrasivos.

Durante este proceso las barras abrasivas presionan hacia afuera contra la superficie de la perforación para producir la acción de corte abrasiva deseada. Son típicas las presiones de rectificación de 10 a 28 Kg/cm^2 , aunque se han reportado presiones fuera de este rango. La herramienta de rectificación se soporta dentro de la perforación por dos juntas universales, ocasionando que la herramienta siga el eje previamente definido de la perforación. La rectificación agranda y termina la perforación, pero no puede cambiar su localización.

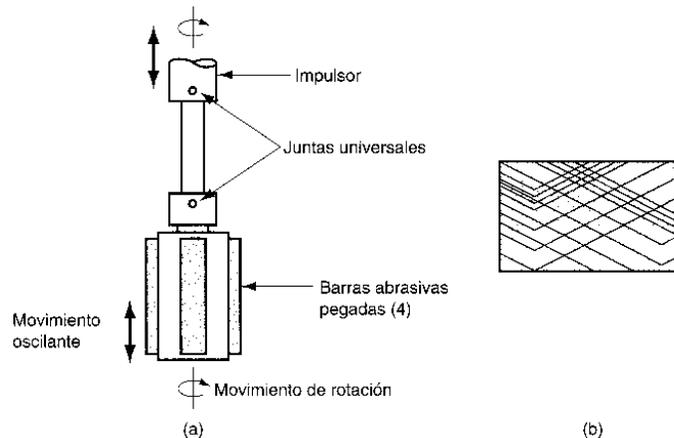


FIGURA 19. El proceso de rectificado fino: (a) herramienta de rectificado que se usa para la superficie interna de la perforación y (b) patrón creado por la acción de la herramienta de rectificado.

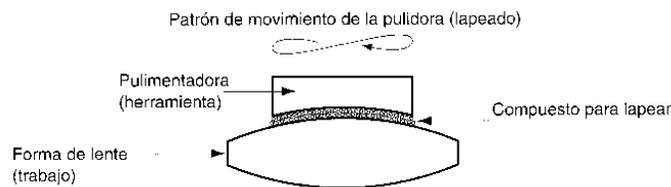


FIGURA 20. El proceso de pulido (lapidado) en la elaboración de lentes.

En rectificado, el tamaño de los granos fluctúa entre 30 y 600. Tanto en el rectificado como en el esmerilado existe la misma relación entre mejor acabado y velocidades de remoción de material. La cantidad de material removido de la superficie de trabajo durante una operación de rectificado puede ser de hasta 0,5 mm, pero generalmente es mucho menor que esto. Es preciso usar un fluido de corte en el rectificado para enfriar y lubricar la herramienta y para ayudar a remover las virutas.

2.2. Pulido o lapidado

El pulido o lapidado es un proceso abrasivo (contrario al pulido convencional) que se usa para producir acabados superficiales de extrema precisión y tersura. Se usa en la producción de lentes, superficies metálicas para rodamientos, calibradores y otras partes que requieren acabados muy finos. Frecuentemente se lapidan las partes metálicas que se someten a cargas de fatiga o superficies que se usan para formar un sello con una parte complementaria.

En lugar de una herramienta abrasiva, el lapidado usa entre la pieza de trabajo y la herramienta de pulimentado una suspensión de partículas abrasivas muy pequeñas en un fluido. La aplicación del proceso en la fabricación de lentes se ilustra en la fig.20. Al fluido con abrasivos se le *llama compuesto para pulido* y tiene la apariencia general de una pasta calcárea. Los fluidos que se usan para hacer el compuesto son aceites y petróleo transparente.

Los abrasivos comunes son óxido de aluminio y carburo de silicio con tamaños de grano típicos entre 300 y 600. La herramienta para pulir o lapidar se llama pulidora y tiene el reverso de la forma deseada en la parte de trabajo. Para realizar el proceso, la pulidora se presiona contra el trabajo y se mueve hacia atrás y adelante sobre la superficie en forma de un ocho u otro patrón de movimiento, sometiendo todas las porciones de la superficie a la misma acción. El pulido se hace algunas veces a mano, pero las máquinas pulidoras realizan el proceso con mayor consistencia y productividad.

Los materiales que se usan para la pulidora van desde acero y fundición de hierro hasta cobre o plomo. Se han hecho ruedas pulidoras de madera. Dado que se usa un compuesto para pulido en lugar de una herramienta abrasiva, el mecanismo de este proceso es de alguna forma diferente al esmerilado y rectificado. Se cree que existen dos mecanismos alternativos de corte en el pulido.

En el primer mecanismo las partículas abrasivas ruedan y se deslizan entre la rueda de pulido y el trabajo, y ocurre muy poca acción de corte en ambas superficies.

En el segundo mecanismo los abrasivos quedan incorporados en la superficie de la pulidora y la acción de corte es muy similar al esmerilado.

Lo más probable es que el pulido sea una combinación de estos mecanismos, dependiendo de la dureza relativa del trabajo y de la pulidora. Para ruedas de materiales blandos, el mecanismo de incorporación de granos es el dominante; y para ruedas duras domina el rodado y deslizado.

2.3. Superacabado

El superacabado es un proceso abrasivo similar al rectificado. Ambos procesos usan una barra con abrasivo pegado, la cual se mueve por una acción oscilante y de compresión contra la superficie que se trabaja. El superacabado difiere del rectificado en los siguientes aspectos: las oscilaciones son más cortas (5 mm), se usan frecuencias más altas (hasta 1.500 oscilaciones por minuto), se aplican presiones más bajas entre la herramienta y la superficie (debajo de 3 Kg/mm²), las velocidades de la pieza de trabajo son más bajas (15 m/min o menos) y los tamaños de granos son generalmente menores (hasta 1.000).

El movimiento relativo entre la barra abrasiva y la superficie de trabajo es variado de manera que los granos individuales no recorren la misma trayectoria. Se usa un fluido de corte para enfriar la superficie del trabajo y eliminar las virutas.

Además, el fluido tiende a separar la barra abrasiva de la superficie de trabajo después de que se alcanza un cierto nivel de tersura en las superficies, de esta forma se previene una acción posterior de corte.

El resultado de estas condiciones de operación son acabados como espejo con valores en la rugosidad superficial cercanos a $0,0254 \mu\text{m}$. El superacabado se puede usar para superficies planas y cilíndricas externas. El proceso se ilustra en la fig.21 para estas últimas superficies.

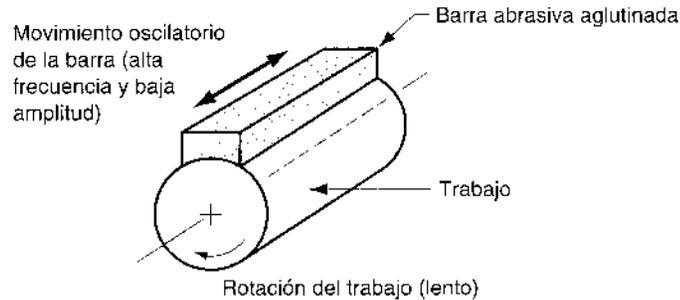


FIGURA 21. Superacabado de una superficie cilíndrica externa.

2.4. Pulido y abrillantado

El pulido se usa para remover raspaduras y rebabas y para alisar las superficies gruesas por medio de granos abrasivos pegados a una rueda de pulido que gira a altas velocidades cerca de 2.300 m/min. Las ruedas se hacen de manta, cuero, fieltro y aún papel. Por consiguiente, estas ruedas son un tanto flexibles. Los granos abrasivos se pegan en la periferia de la rueda. Cuando se gastan los abrasivos, se vuelve a pegar la rueda con nuevos granos. El tamaño de los granos es de 20 a 80 para pulido basto y de 90 a 120 para pulido fino, y arriba de 120 para acabados más finos. Las operaciones de pulido se realizan frecuentemente a mano.

El abrillantado es similar en apariencia al pulido, pero su función es diferente. El abrillantado se usa para producir superficies atractivas de alto lustre. Las ruedas de abrillantado se hacen de materiales similares a las ruedas de pulido (cuero, fieltro, algodón y otras), pero las ruedas de abrillantado son por lo general más blandos. Los abrasivos son muy finos y están contenidos en un compuesto de abrillantado que se presiona en la superficie externa de la rueda mientras gira.

Esto contrasta con el pulido, en el cual los granos de abrasivos están pegados a la superficie de la rueda. Las partículas abrasivas deben reponerse periódicamente como en el pulido. El abrillantado se ejecuta a velocidades entre 2.500 y 5.000 m/min. El abrillantado se hace por lo general manualmente como en el pulido, aunque se han diseñado máquinas para realizar el proceso automáticamente.

3. MAQUINADO NO TRADICIONAL Y PROCESOS DE CORTE TERMICO

Los procesos de maquinado convencionales (por ejemplo, el torneado, el taladrado y el fresado) usan una herramienta de corte afilada para formar una viruta de un trabajo mediante deformación por una fuerza cortante. Además de estos métodos convencionales, hay un conjunto de procesos que usa otros mecanismos para remover materiales.

El término *maquinado no tradicional* se refiere a este grupo de procesos, los cuales remueven el exceso de material mediante diversas técnicas que incluyen la energía mecánica, térmica, eléctrica o química (o combinaciones de ellas). Estos procesos no usan un instrumento afilado de corte en el sentido convencional.

Desde la Segunda Guerra Mundial se han desarrollado procesos no tradicionales, como respuesta a los requerimientos nuevos y singulares que no pueden cumplirse mediante métodos convencionales. Estos requerimientos y la importancia comercial tecnológica de los procesos no tradicionales incluyen los siguientes:

- La necesidad de maquinar metales y no metales recién desarrollados. Estos materiales nuevos con frecuencia tienen propiedades especiales (por ejemplo, alta resistencia, tenacidad y dureza), lo cual dificulta o imposibilita maquinarlos mediante métodos convencionales.
- Necesidad de realizar geometrías de partes singulares o complejas que no se obtienen con facilidad y que, en algunos casos, son imposibles de preparar mediante maquinado convencional.
- Necesidad de evitar daños externos en una parte, lo cual sucede frecuentemente por las tensiones que surgen por el maquinado convencional.

Muchos de estos requerimientos están asociados con las industrias de la aeronáutica, el espacio y la electrónica, las cuales se han desarrollado en forma significativa durante las cuatro décadas pasadas. Hay docenas de procesos de maquinado no tradicionales y gran parte de ellos son singulares en su rango de aplicaciones. En este capítulo analizaremos los de mayor importancia comercial

Los procesos no tradicionales se clasifican de acuerdo con la forma principal de energía que usan para remover materiales. En esta clasificación hay cuatro tipos:

- 1). *Mecánicos*. En estos procesos no tradicionales se usa energía mecánica en alguna forma diferente a la acción de una herramienta de corte convencional. La forma común de acción mecánica en los procesos es el trabajo mediante una corriente de alta velocidad de abrasivos o fluidos (o ambos).
- 2). *Eléctricos*. Estos procesos no tradicionales usan energía electroquímica para remover material; el mecanismo es lo opuesto a la electro deposición.
- 3). *Térmicos*. Estos procesos usan energía térmica para cortar o dar forma a una parte del trabajo. En general se aplica energía térmica a una parte muy pequeña de la superficie de trabajo, provocando que esa parte se remueva por fusión o vaporización del material. La energía térmica se genera mediante la conversión de energía eléctrica.
- 4). *Químicos*. La mayoría de los materiales (en particular los metales) son susceptibles de ataques químicos por medio de ciertos ácidos y otras sustancias. En el maquinado químico, las sustancias seleccionadas remueven el material de algunas áreas de las piezas, mientras que otras zonas de la superficie se protegen con una mascarilla.

3.1. PROCESOS DE ENERGIA MECÁNICA

En esta sección examinaremos varios de los procesos no tradicionales de energía mecánica:

- 1) el maquinado ultrasónico,
- 2) el corte con chorro de agua,
- 3) el corte con chorro de agua abrasiva y
- 4) el maquinado con chorro abrasivo.

3.1.1. Maquinado ultrasónico

El maquinado ultrasónico MU (en inglés USM) es un proceso de maquinado no tradicional en el cual se dirigen a alta velocidad abrasivos contenidos en una pasta fluida sobre una pieza, mediante una herramienta vibratorio en amplitud baja, de alrededor de 0,076 mm y en una alta frecuencia de aproximadamente 20.000 Hz. La herramienta oscila en una dirección perpendicular a la superficie de trabajo y se alimenta lentamente para que la parte adopte la forma deseada. Sin embargo, lo que ejecuta el corte es la acción de los abrasivos, chocando contra la superficie de trabajo. El arreglo general del procesos de USM se muestra en la fig. 22.

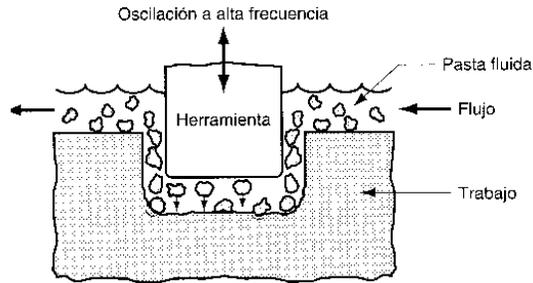


FIGURA 22. Maquinado ultrasónico (USM).

Los materiales de herramientas comunes que se usan en el USM incluyen el acero blando y el acero inoxidable. Los materiales abrasivos incluyen el nitrato de boro, el carburo de boro, el óxido de aluminio, el carburo de silicio y el diamante. El tamaño de las partículas de piedra para el esmeril varía entre 100 y 2.000. La amplitud de vibración debe establecerse aproximadamente igual al tamaño del esmeril y el tamaño del boquete debe mantenerse en alrededor del doble del esmeril. En un grado significativo, el tamaño del esmeril determina el acabado externo en la nueva pieza de trabajo.

Además del acabado externo, la velocidad de remoción de materiales es una importante variable de rendimiento en el maquinado ultrasónico. Para determinado material de trabajo, la velocidad de remoción en el maquinado ultrasónico aumenta, al incrementar la frecuencia y la amplitud de vibración, es decir, es directamente proporcional. Estas relaciones se muestran en la fig. 23.

La acción de corte en el USM afecta tanto a la herramienta como al trabajo. Conforme las partículas abrasivas erosionan la superficie de trabajo, también desgastan la herramienta y afectan su forma. Por lo tanto, es importante conocer los volúmenes relativos que se remueven del material de trabajo y de la herramienta durante el proceso, así como la velocidad de esmerilado. Esta razón de materia prima removida por desgaste de la herramienta varía para diferentes materiales de trabajo, en proporciones que van desde 100:1 para cortar vidrio, hasta 1:1 para cortar acero de herramientas.

La pasta fluida en el USM consiste en una mezcla de agua y partículas abrasivas. La concentración de abrasivos en el agua varía del 20 al 60%. La pasta debe circular en forma continua para que entren en acción los granos frescos en la abertura entre la herramienta y la pieza de trabajo. También sirve para retirar las virutas y los restos de esmeril producidos por el proceso de corte.

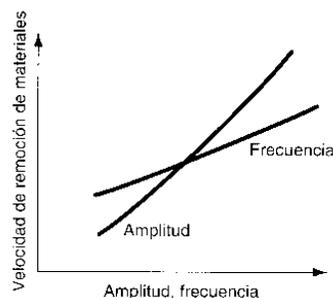


FIGURA 23. Efecto de la frecuencia de oscilación y la amplitud sobre la velocidad de remoción de materiales en el maquinado ultrasónico.

El maquinado ultrasónico se desarrolló por la necesidad de maquinar materiales de trabajo duros y frágiles, tales como la cerámica, el vidrio y los carburos. También se usa con éxito sobre ciertos materiales, tales como el acero inoxidable y el titanio. Las formas que se obtienen mediante el USM incluyen orificios no redondeados, orificios a lo largo de un eje curvo y operaciones de acuñado, en las cuales se difunde un patrón de imágenes en la herramienta para una superficie de trabajo plana.

3.1.2. Procesos con chorro de agua y chorro abrasivo

Los procesos descritos en esta sección remueven material mediante corrientes de alta velocidad de agua, abrasivos o una combinación de ambos.

Corte con chorro de agua: El *corte con chorro de agua* (en inglés WJC) usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte, como se ilustra en la fig. 24. También se emplea el nombre *maquinado hidrodinámico* para este proceso, pero el corte por chorro de agua es el término de uso más frecuente en la industria.

Para obtener una fina corriente de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla de un diámetro de 0,1 a 0,4 mm. A fin de que la corriente tenga la energía suficiente para cortar se usan presiones hasta de 420 Mpa (4.200 Kg/cm²), y el chorro alcanza velocidades hasta de 900 m/seg. Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte de acero inoxidable y una boquilla de zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el de mayor costo.

En el WJC deben usarse sistemas de filtración para separar las virutas producidas durante el proceso. Los fluidos de corte en este sistema son soluciones de polímeros, las cuales se prefieren debido a que tienden a producir una corriente coherente.

Los parámetros de proceso importantes en el WJC incluyen la distancia de separación, el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. En la fig. 24., la distancia de separación es la abertura entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que golpee la superficie. Una distancia de separación normal es de 3,2 mm.

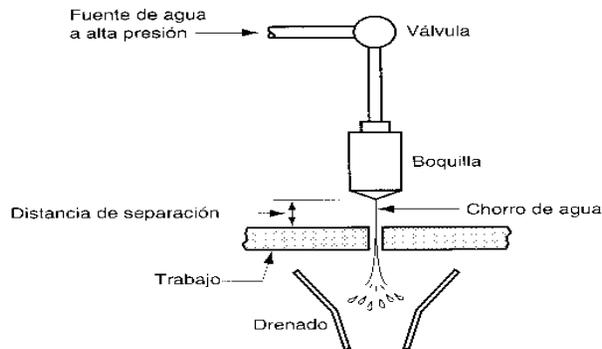


FIGURA 24. Corte con chorro de agua.

El tamaño del orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados. Para cortar materia prima más gruesa se requieren corrientes de chorro más densas y mayores presiones. La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte.

La velocidad de avance típica varía desde 5 hasta 500 mm/seg, dependiendo del material de trabajo y su grosor. Por lo general, el WJC se hace en forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipular la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

El WJC se usa en forma eficaz para obtener tiras de materia prima plana, como plásticos, textiles, materiales compuestos, mosaicos para pisos, alfombras, piel y cartulinas. Se han instalado celdas robóticas con boquillas para WJC ensambladas como la herramienta de un robot para seguir patrones tridimensionales de corte irregular, por ejemplo para cortar y recortar tableros de automóvil antes del ensamble.

En estas aplicaciones, la ventaja del WJC es que la superficie de trabajo no se tritura ni quema como en otros procesos mecánicos o térmicos, en consecuencia, la pérdida de material es mínima porque la ranura de corte es estrecha, esto reduce la contaminación ambiental y existe la facilidad de automatizar el proceso usando controles numéricos o robots industriales. Una limitación del WJC es que no es conveniente para cortar materiales frágiles (por ejemplo, vidrio), porque tiende a resquebrajarlos durante el proceso.

Corte con chorro de agua abrasiva: Cuando se usa un WJC sobre partes metálicas, por lo general deben agregarse partículas abrasivas a la corriente a chorro para facilitar el corte. Por lo tanto, este proceso se denomina *corte con chorro de agua abrasivo* (en inglés AWJC). La incorporación de las partículas abrasivas al flujo complica el proceso porque aumenta la cantidad de parámetros que deben controlarse.

Entre los parámetros de proceso adicionales están el tipo de abrasivo, el tamaño del esmeril y la velocidad de flujo. Entre los materiales abrasivos comunes están el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato); los tamaños del esmeril varían entre 60 y 120. Las partículas abrasivas se agregan a la corriente de agua a aproximadamente 0.23 kg/min después de que salen de la boquilla para el WJC.

Los parámetros de proceso restantes incluyen algunos que son comunes para el WJC: el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación. Los diámetros del orificio de la boquilla varían de 0,25 a 0,63 mm, este rango es más grande que en el WJC y permite que la corriente contenga velocidades de flujo más altas y mayor energía antes de la inyección de los abrasivos.

Las presiones del agua son similares a las del WJC. Las distancias de separación son menores para reducir el efecto de la dispersión del fluido de corte, el cual contiene partículas abrasivas en esta etapa. Las distancias de separación comunes están entre una cuarta parte y la mitad de las que se usan en el WJC.

Maquinado con chorro abrasivo: No se debe confundir el corte con chorro de agua abrasiva con el proceso denominado *maquinado con chorro abrasivo* (en inglés AJM), el cual es un proceso de remoción de materiales que se produce por la acción de una corriente de gas a alta velocidad que contiene pequeñas partículas abrasivas, como se muestra en la fig. 25. El gas es seco, y se usan presiones de 0,2 a 1,4 MPa para propulsar el gas por los orificios de la boquilla con un diámetro de 0,075 a 1 mm), a velocidades de 2,5 a 5,0 m/seg. Los gases incluyen el aire seco, el nitrógeno, el dióxido de carbono y el helio.

Por lo general, el proceso lo realiza un operador en forma manual, quien dirige la boquilla al trabajo. Las distancias normales entre la punta de la boquilla y la superficie de trabajo varían entre 3 y varios mm. La estación de trabajo debe contar con ventilación apropiada para el operador.

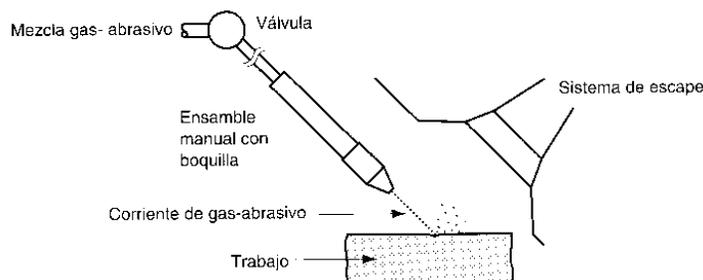


FIGURA 25 Maquinado con chorro abrasivo (WIC).

Normalmente se usa el AJM para aplicar un acabado y no como un proceso de corte dentro de la producción. Las aplicaciones incluyen la remoción de virutas, el recorte y retiro de rebabas, la limpieza y el pulido. Los cortes se llevan a cabo sobre materiales duros y frágiles (por ejemplo, vidrio, silicio, mica y cerámica) que están en forma de materias primas planas y delgadas.

Los abrasivos normales usados en el maquinado con chorro abrasivo incluyen el óxido de aluminio (para aluminio y latón), el carburo de silicio (para acero inoxidable y cerámica) y las perlas de vidrio (para pulido). Los tamaños de partícula del abrasivo son pequeños, sus diámetros oscilan entre 15 y 40 μm , y su tamaño debe ser muy uniforme para determinadas aplicaciones. Es importante no reciclar los abrasivos debido a que los granos usados se fracturan (por lo cual se reduce su tamaño), se gastan y contaminan.

3.2. PROCESOS ELECTROQUÍMICOS DE MAQUINADO

Un grupo importante de procesos no tradicionales utiliza la energía eléctrica para remover el material. Este grupo se identifica con el término de procesos electroquímicos, debido a que se usa la energía eléctrica junto con reacciones químicas para obtener la remoción. De hecho, estos procesos son lo opuesto a la electro deposición. El material de trabajo debe ser un conductor en el maquinado electroquímico.

3.2.1. Maquinado electroquímico

El proceso básico en este grupo es el *maquinado electroquímico*, ME (en inglés ECM). El maquinado electroquímico retira material de una pieza de trabajo conductora de electricidad por medio de disolución anódica, en la cual se obtiene la forma de la pieza de trabajo a través de una herramienta formada por electrodos, muy próxima al trabajo, pero al mismo tiempo separada de él mediante un electrolito que fluye con rapidez.

Como muestra la fig. 26, la pieza de trabajo es el ánodo y la herramienta es el cátodo. El proceso aplica el principio de que el material se retira de la pieza que funciona como ánodo (el polo positivo) y se deposita en el cátodo (el polo negativo) ante la presencia de un baño electrolítico. La diferencia en el ECM es que el baño electrolítico fluye con rapidez entre los dos polos para retirar el material removido de la chapa. Por lo tanto, el material que se retira de la pieza no forma una chapa sobre la herramienta.

Por lo general se diseña una herramienta de electrodos (hecha de cobre, bronce o acero inoxidable) que posee aproximadamente la forma inversa a la que se desea obtener. Debe considerarse la separación entre la herramienta y el trabajo. Para conseguir la remoción de metal, se alimenta el electrodo dentro del trabajo a una velocidad igual a la velocidad de remoción del metal de trabajo.

La velocidad de remoción del metal se determina por medio de la primera ley de Faraday, que establece que la cantidad de cambio químico que produce una corriente eléctrica (o sea, la cantidad de metal disuelto) es proporcional a la cantidad de electricidad transmitida (corriente x tiempo). Esto se expresa mediante:

$$V = C \cdot I \cdot t \quad (12)$$

donde V = volumen de metal removido, en cm^3 ; C = una constante llamada la velocidad de remoción específica, que depende del peso atómico, la valencia y la densidad del material de trabajo, en $\text{cm}^3/\text{A} \cdot \text{min}$.; I = corriente en A; y t = tiempo en min.

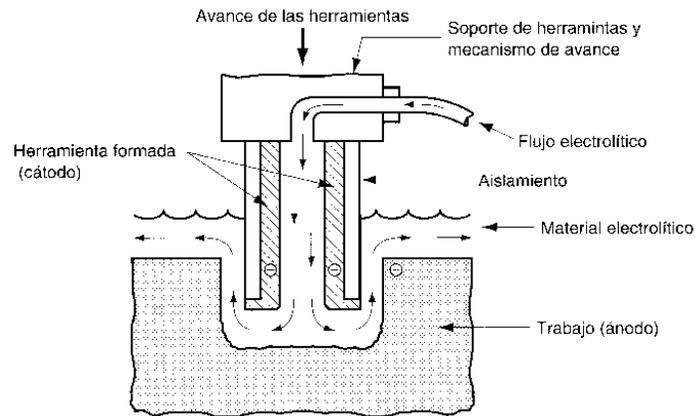


FIGURA 26. Maquinado electro-químico

En base en la ley de Ohm, la corriente $I = E/R$, donde $E =$ voltaje y $R =$ resistencia. Bajo las condiciones de la operación de maquinado electroquímico, la resistencia se proporciona mediante:

$$R = \frac{g \cdot r}{A} \quad (13)$$

donde $g =$ separación entre el electrodo y el trabajo, en cm; $r =$ resistividad del material electrolítico, en ohm-cm; y $A =$ área de superficie entre el trabajo y la herramienta en la separación frontal de trabajo, en cm^2 . Sustituyendo esta expresión para R en la ley de Ohm, tenemos

$$I = \frac{E \cdot A}{g \cdot r} \quad (14)$$

Al incorporar la expresión matemática anterior en la ecuación que define la ley de Faraday, tenemos:

$$V = \frac{C(E \cdot A \cdot t)}{g \cdot r} \quad (15)$$

Es conveniente convertir esta ecuación a una expresión para velocidad de avance, que es la velocidad a la cual el electrodo (la herramienta) puede avanzar dentro del trabajo. Esta conversión se consigue en dos pasos. Primero, dividimos la ecuación (15) por $A \cdot t$ (área x tiempo) para convertir el volumen de metal removido a una velocidad de desplazamiento lineal:

$$\frac{V}{A \cdot t} = f_r = \frac{C \cdot E}{g \cdot r} \quad (16)$$

en donde $f_r =$ velocidad de alimentación, en cm/seg. Segundo, sustituimos I/A en lugar de $E/(g \cdot r)$, como lo plantea la ecuación (14). Por tanto, la velocidad de alimentación en el ECM es:

$$f_r = \frac{C \cdot I}{A} \quad (17)$$

donde $A =$ el área frontal del electrodo, en cm^2 . Ésta es el área proyectada de la herramienta en la dirección del avance dentro del trabajo. Los valores de la velocidad de remoción específica C se presentan en la tabla 3 para diferentes materiales de trabajo. Debemos señalar que esta ecuación supone una eficiencia del 100% en la remoción de metal. La eficiencia real está en el rango del 90 al 100% y depende de la forma de herramienta, el voltaje y la densidad de corriente, así como de otros factores.

Material de trabajo ^a	Velocidad de remoción específica C (cm ³ /A-seg.)
Aluminio (3)	3,44 . 10 ⁻⁵
Cobre (1)	7,35. 10 ⁻⁵
Hierro (2)	3,69. 10 ⁻⁵
Aceros:	
De baja aleación	3,00. 10 ⁻⁵
De alta aleación	2,73. 10 ⁻⁵
Inoxidable	2,46. 10 ⁻⁵
Níquel (2)	3,42. 10 ⁻⁵
Titanio (4)	2,73. 10 ⁻⁵

TABLA 3. Valores típicos de una velocidad de remoción específica C para materiales de trabajos seleccionados en el maquinado electroquímico.

^a La valencia más común se proporciona entre paréntesis y se supone para determinar la velocidad de remoción específica C. Para una valencia diferente, C se calcula multiplicando este valor por la valencia más común y dividiéndola por la valencia real.

Las ecuaciones anteriores indican que los parámetros de proceso más importantes para determinar la velocidad de remoción de metal y la velocidad de alimentación en el maquinado electroquímico son: la distancia de separación g , la resistividad electrolítica r , la corriente I y el área frontal de electrodos A . La distancia de separación necesita controlarse con mucha atención.

Si g se hace demasiado grande, el proceso electroquímico se vuelve lento. Sin embargo, si el electrodo toca el trabajo, ocurre un corto circuito que detiene todo el proceso. Como una cuestión práctica, la distancia de separación por lo general se mantiene dentro de un rango de 0,075 a 0,75 mm.

El agua se utiliza como base para el material electrolítico en el ECM. Para reducir la resistividad del material electrolítico se añaden sales a la solución, tales como NaCl o NaNO₃. Además de retirar los materiales removidos de la pieza de trabajo, el flujo electrolítico también sirve para retirar el calor y las burbujas de hidrógeno que se crean en las reacciones químicas del proceso.

El material de trabajo removido está en forma de partículas microscópicas que deben de separarse del material electrolítico mediante centrifugado, sedimentación u otros medios. Las partículas separadas forman una gruesa capa cuya disposición es un problema ambiental asociado con el ECM. Se requieren grandes cantidades de corriente eléctrica para ejecutar un ECM.

Como indican las ecuaciones, la corriente eléctrica determina la velocidad de remoción de metal, específicamente la densidad de corriente que se proporciona para la operación. El voltaje en un ECM se conserva relativamente bajo para minimizar la generación de arcos a través de la separación.

Por lo general, el maquinado electroquímico se usa en aplicaciones donde el metal de trabajo es muy duro o difícil de maquinar o donde es difícil (o imposible) obtener una geometría de partes de trabajo mediante métodos de maquinado convencionales. La dureza del trabajo no representa una diferencia en el ECM, debido a que la remoción del metal no es mecánica. Las aplicaciones comunes del ECM incluyen:

- 1) inmersión de dados, la cual implica el maquinado de formas y contornos irregulares en dados de forja, moldes plásticos y otras herramientas de formado;
- 2) taladrado de orificios múltiples, es posible taladrar muchos orificios en forma simultánea con el ECM, a diferencia del taladrado convencional que requiere que los orificios se hagan en forma secuencial;
- 3) orificios que no son redondos, dado que el maquinado electroquímico no usa un taladro rotatorio; y
- 4) la remoción de virutas .

Las ventajas del ECM incluyen :

- 1) poco daño superficial a la parte de trabajo,
- 2) no hay virutas como en el maquinado convencional,
- 3) un bajo desgaste de herramienta (el único desgaste de herramienta se produce por el flujo electrolítico) y
- 4) velocidades de remoción de metal relativamente altas para metales duros y difíciles de maquinar.

Las desventajas del ECM son:

- 1) un alto costo de corriente eléctrica para conducir la operación y
- 2) problemas de disposición de la masa electrolítica.

3.2.2. Remoción de virutas y esmerilado con material electroquímico

La *remoción electroquímica de virutas*, REV (en inglés ECD), es una adaptación del ECM diseñada para retirar las virutas o para redondear las esquinas agudas de partes de trabajo metálico mediante disolución anódica. En la fig. 27 se muestra una disposición posible para la ECD.

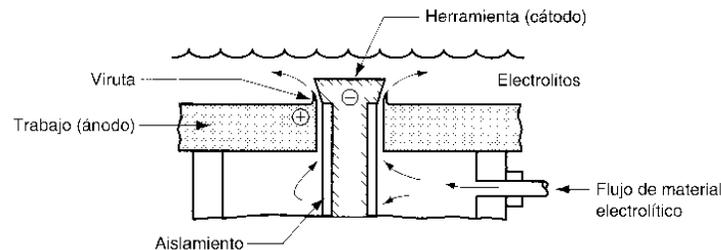


FIGURA 27. Remoción electroquímica de virutas (REV).

El orificio en la parte de trabajo tiene una viruta filosa del tipo que se produce en una operación de taladrado convencional a través de un orificio. La herramienta de electrodos está diseñada para concentrar la acción de remoción de metal en la viruta. Se aíslan las partes de la herramienta que no se usan para el maquinado. El material electrolítico fluye por el orificio para alejar las partículas de la viruta.

En la ECD se aplican los mismos principios de la operación de ECM. Sin embargo, dado que se retira mucho menos material en una ECD, los ciclos de tiempo son mucho más breves. Un ciclo de tiempo normal en la remoción electroquímica de virutas es menor de un minuto. El tiempo aumenta si se pretende redondear una esquina además de remover la viruta.

El *esmerilado electroquímico*, EE (en inglés ECG), es una forma especial de ECM, en la cual se usa una rueda de esmeril rotatoria con un material de enlace conductor para aumentar la disolución anódica del exterior metálico de la parte de trabajo, como muestra la fig. 28. Los abrasivos usados en el ECG incluyen el óxido de aluminio y el diamante.

El material de enlace es metálico (para abrasivos de diamante) o es resina impregnada con partículas metálicas para hacerlo eléctricamente conductor (para el óxido de aluminio). Los granos abrasivos que sobresalen de la rueda de esmeril y entran en contacto con la parte de trabajo, establecen la distancia de separación en el ECG. Los electrolitos fluyen por la separación entre los granos para cumplir su función en la electrólisis.

La remoción de chapa es responsable del 95% o más del retiro de metal en el esmerilado electroquímico, y la acción abrasiva de la rueda de esmeril elimina el 5% restante o menos, sobre todo en forma de películas salinas que se producen en la superficie de trabajo durante las reacciones electroquímicas. Debido a que gran parte del maquinado se consigue mediante acción electroquímica, una rueda de esmeril en este proceso dura mucho más que una rueda en el esmerilado convencional.

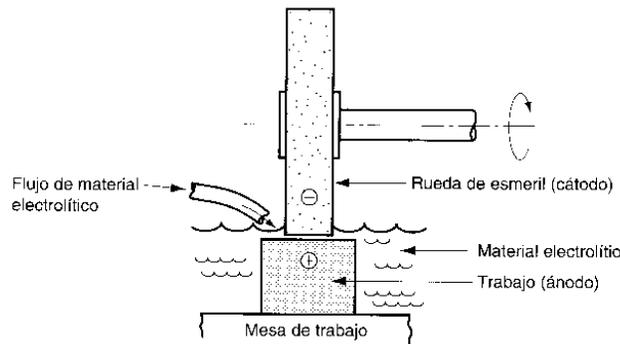


FIGURA 28. Esmerilado electroquímico.

El resultado es una velocidad de esmerilado mucho más alta. Además, el revestimiento de la rueda de esmeril se realiza con menor frecuencia. Éstas son las ventajas importantes del proceso. Las aplicaciones del ECG incluyen el afilado de herramientas de carburo fortalecido y el esmerilado de agujas quirúrgicas, aparte de tubos de pared delgados y partes frágiles.

3.3. PROCESOS DE ENERGÍA TÉRMICA

Los procesos de remoción de material basados en la energía térmica se caracterizan por temperaturas locales muy altas con calor suficiente para remover material mediante fusión o vaporización. Debido a las altas temperaturas, estos procesos producen daños físicos y metalúrgicos en la nueva superficie de trabajo. En algunos casos, el acabado resultante es tan pobre que se requiere un procesamiento posterior para alisar la superficie.

Examinamos varios procesos de energía térmica que tienen importancia comercial:

- 1) maquinado por descarga eléctrica y corte con alambre de descarga eléctrica,
- 2) maquinado con haz de electrones,
- 3) maquinado con rayo láser,
- 4) maquinado con arco de plasma y
- 5) procesos convencionales de corte térmico.

Los procesos de remoción de material con descarga eléctrica retiran metal mediante una serie de descargas eléctricas discontinuas (chispas) que producen temperaturas localizadas suficientemente altas para fundir o vaporizar el metal en la región inmediata a la descarga. Los dos procesos principales en esta categoría son:

- 1) el maquinado por descarga eléctrica y
- 2) el maquinado por descarga eléctrica con alambre.

Estos procesos sólo pueden usarse en materiales de trabajo eléctricamente conductivos.

Maquinado por descarga eléctrica (electroerosión convencional): El maquinado por descarga eléctrica (en inglés EDM) es uno de los procesos no tradicionales de uso más amplio. La fig. 29 muestra una disposición de EDM. La forma de la superficie de trabajo acabada se produce mediante una herramienta formada por electrodos. Ocurren chispas a través de una pequeña separación entre la herramienta y la superficie de trabajo. El proceso de EDM debe realizarse en presencia de un fluido dieléctrico, el cual crea una trayectoria para cada descarga conforme se ioniza el fluido en la separación.

Las descargas se generan mediante un transformador de corriente continua pulsante conectado a la pieza y a la herramienta. La fig. 29(b) muestra un acercamiento de la separación entre la herramienta y la pieza. La descarga ocurre en la posición donde están más cerca las dos superficies. El fluido dieléctrico se ioniza en esta posición a fin de crear una trayectoria para la descarga. La región en la que ocurre la descarga se calienta a temperaturas muy altas, de modo que se derrite repentinamente y se remueve una pequeña parte de la superficie de la pieza. Después, el flujo dieléctrico aleja la partícula pequeña (viruta).

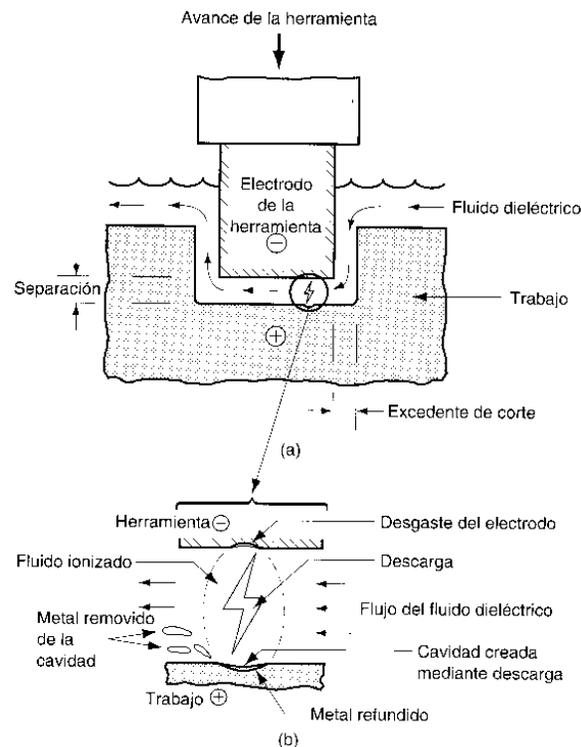


FIGURA 29. Maquinado por descarga eléctrica: (a) disposición general y (b) vista de acercamiento de la separación, mostrando la descarga y la remoción de metal.

Dado que la superficie de la pieza en la posición previa de la descarga está ahora separada de la herramienta por una distancia mayor, ésta es la posición menos probable para que ocurra otra chispa hasta que las regiones que la rodean se hayan reducido al mismo nivel o uno inferior. Aunque las descargas individuales retiran material en puntos muy localizados, ocurren cientos o miles de veces por segundo, de modo que sucede una erosión gradual de toda la superficie en el área de la separación.

Dos variables importantes en el proceso de EDM son la corriente de descarga y su frecuencia. Conforme aumenta cualquiera de estos parámetros, se incrementa la velocidad de remoción de metal. La aspereza de la superficie también es afectada por la corriente y la frecuencia, como se muestra en la fig. 30. No obstante, cuando el EDM se opera a frecuencias altas y corrientes de descarga bajas, se puede obtener un mejor acabado en la superficie.

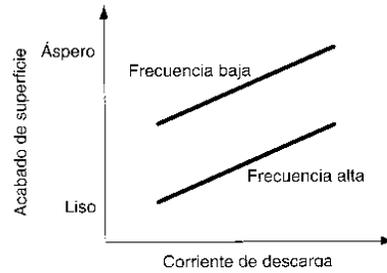


FIGURA 30. Acabado de la superficie en el maquinado por descarga eléctrica (EDM) como una función de la corriente de descarga y la frecuencia de las descargas.

Conforme la herramienta de electrodos penetra en la pieza ocurre un excedente de corte. El *excedente de corte* en el EDM es la distancia que rebasa el tamaño de la herramienta para producir un orificio de maquinado más grande en la pieza de trabajo. Este efecto se debe a que las descargas eléctricas ocurren tanto a los lados de la herramienta, como en el extremo. El excedente de corte es una función de la corriente y la frecuencia, como se ilustra en la fig. 31, y puede ascender a varias milésimas de una pulgada.

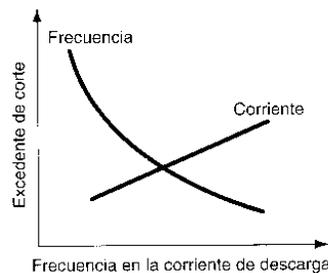


FIGURA 31. Excedente de corte en el maquinado por descarga eléctrica (EDM) como una función de la corriente de descarga y la frecuencia de las descargas.

Debe señalarse que las altas temperaturas de chispa que funden la pieza también afectan a la herramienta, creando una pequeña cavidad en la superficie opuesta a la cavidad producida en la pieza. Por lo general, el desgaste de la herramienta se mide como la razón del material de trabajo removido entre el material removido de la herramienta (es igual a la razón de esmerilado).

Esta razón de desgaste varía entre 1 y 100 o un poco más, dependiendo de la combinación del trabajo y los materiales de los electrodos. Los electrodos están hechos de grafito, cobre, bronce, tungsteno, plata y otros materiales.

La selección depende del tipo del circuito del transformador de corriente disponible en la máquina para EDM, el tipo de material de la pieza que se va a maquinar y si se va a pulir o dar un acabado al material. En muchas aplicaciones se prefiere el grafito debido a sus características de fusión.

De hecho, el grafito no se funde, sino que se vaporiza a muy altas temperaturas, y la cavidad creada por la chispa generalmente es más pequeña que en los restantes materiales de electrodos para EDM. En consecuencia, se obtiene una razón de desgaste alta con las herramientas de grafito.

La dureza y la resistencia del material de trabajo no son factores en el EDM, dado que el proceso no es una lucha de la dureza entre la herramienta y el trabajo. El punto de fusión del material de la pieza es una propiedad importante, y la velocidad de remoción del metal se relaciona en forma aproximada, con el punto de fusión mediante la siguiente fórmula empírica:

$$MRR = \frac{K \cdot I}{T_m^{1,23}} \quad (18)$$

donde MRR = velocidad de remoción de metal, en cm^3/min ; K = constante de proporcionalidad cuyo valor = 5,08 en unidades comunes de EU (equivalentes a 39,86 en unidades del Sistema Internacional); I = corriente de descarga, en A; y T_m = temperatura de fusión del metal de trabajo, en $^{\circ}\text{C}$.

Los fluidos eléctricos usados en el EDM incluyen los aceites hidrocarbonados, el kerosene y el agua destilada o deionizada. El fluido dieléctrico funciona como un aislante en la separación, excepto cuando ocurre una ionización en presencia de una chispa. Otras de sus funciones consisten en desalojar los desperdicios de la separación y retirar el calor de la herramienta y la parte de trabajo.

Las aplicaciones del maquinado por descarga eléctrica incluyen tanto la fabricación de herramientas como la producción de piezas. Con frecuencia, la fabricación de herramientas para muchos de los procesos mecánicos analizados en este libro se hacen mediante EDM, incluyendo moldes para inyección en plásticos, matrices para extrusión, matrices para estirado de alambres, matrices para forja y recalado y matrices para estampado en láminas metálicas, ver fig. 32.

Para muchas de estas aplicaciones, los materiales usados para habilitar herramientas son difíciles (o imposibles) de maquinar por métodos convencionales. Ciertas partes de un producto también requieren de una aplicación de EDM.

Los ejemplos incluyen algunas partes delicadas que no son lo bastante rígidas para soportar las fuerzas de corte convencionales como en el taladrado de orificios en ángulo agudo con respecto a la superficie, donde con un taladrado convencional no sería posible de iniciar el orificio, y en el maquinado para producción de metales duros y exóticos.

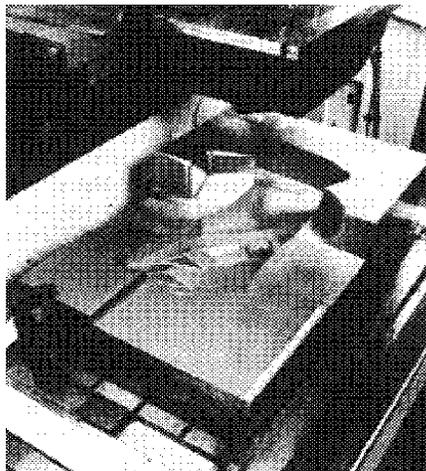


FIGURA 32. Una cavidad para forja fabricada mediante maquinado por descarga eléctrica (EDM). El electrodo es el objeto muy oscuro encima de la cavidad.

Corte por descarga eléctrica con alambre (electroerosión por hilo): El *corte por descarga eléctrica con alambre* (en inglés EDWC) es una forma especial del EDM, que usa un alambre de diámetro pequeño como electrodo para cortar un canal delgado en la pieza. La acción de corte en el EDWC se obtiene por medio de energía térmica, a partir de las descargas eléctricas entre el alambre electrodo y la pieza de trabajo. El EDWC se ilustra en la fig. 33. La pieza de trabajo se alimenta en forma continua y lenta a través del alambre para obtener la trayectoria de corte deseada, de un modo parecido a una operación con sierra tipo cinta. El control numérico se usa para fijar los movimientos de la pieza durante el corte.

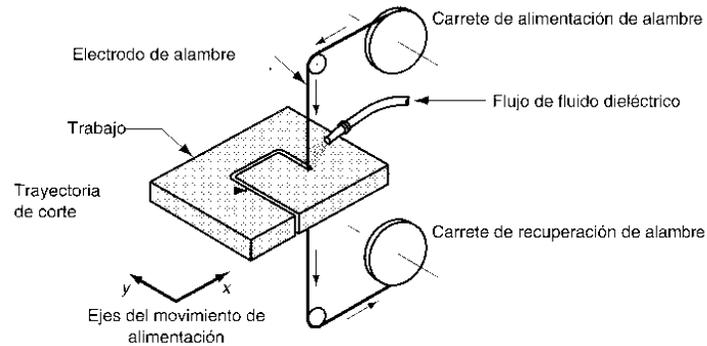


FIGURA 33. Corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC), también llamado maquinado por descarga eléctrica con alambre.

Conforme procede la operación de corte, el alambre avanza en forma continua entre un carrete de alimentación y uno de recuperación del mismo para presentar un electrodo nuevo de diámetro constante para el trabajo. Esto ayuda a mantener un ancho de corte constante durante el proceso.

Al igual que en el EDM, el maquinado por descarga eléctrica con alambre debe realizarse en presencia de un material dieléctrico. Éste puede aplicarse ya sea mediante boquillas dirigidas a la interfase herramienta-pieza, como en nuestra figura, o por inmersión de la pieza en un baño dieléctrico.

Los diámetros del alambre varían entre 0,076 a 0,30 mm, dependiendo del ancho del corte requerido. Los materiales que se usan para el alambre incluyen el latón, el cobre, el tungsteno y el molibdeno. Los fluidos dieléctricos incluyen el agua deionizada o el aceite.

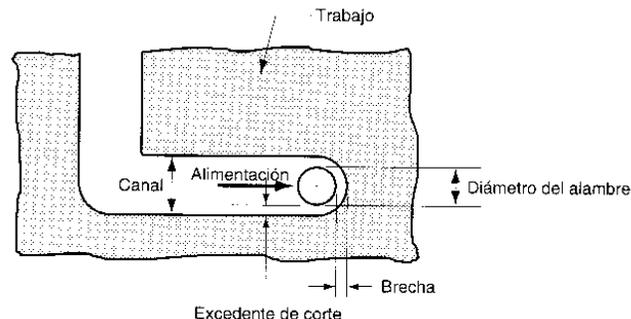


FIGURA 34. Definición del canal y el excedente en el corte por descarga eléctrica por alambre.

Al igual que en el EDM simple, en el maquinado por descarga eléctrica con alambre también existe un exceso de corte, que provoca que el corte sea mayor que el diámetro del alambre, como se muestra en la fig. 34. Este excedente de corte está en el rango de 0,020 a 0,050 mm. Una vez establecidas las condiciones de corte para una acción determinada, el excedente de corte permanece bastante constante y predecible.

Aunque el EDWC se asemeja a una operación con sierra tipo cinta, su precisión es mucho mayor que la de esta última. El canal es más pequeño, y es posible hacer más agudas las esquinas, y por lo tanto, las fuerzas de corte en contra de la pieza son nulas. Además, la dureza y la resistencia del material de la pieza no afectan el rendimiento del corte. El único requisito es que el material de la pieza debe ser eléctricamente conductor.

Las características especiales del EDWC lo hacen ideal para fabricar componentes para matrices de estampado. Debido que el canal es tan pequeño, con frecuencia es posible fabricar perforados y matrices en un solo corte, como lo sugiere la fig. 35.

El corte mediante EDWC también incluye la manufactura de otras herramientas y partes con formas de contornos complicados, tales como herramientas en forma de torno, matrices para extrusión y plantillas planas.

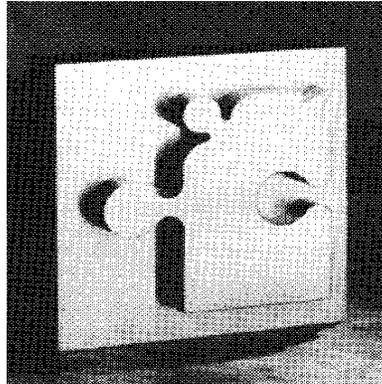


FIGURA 35. Corte de contorno irregular de un bloque sólido de metal mediante maquinado por descarga eléctrica con alambre.

3.3.2. Maquinado con haz de electrones

El maquinado con haz de electrones, MHE (en inglés EBM) es uno de los varios procesos industriales que usan haces de electrones. Además del maquinado, otras aplicaciones de la tecnología incluyen el tratamiento térmico y la soldadura. *El maquinado con haz de electrones* utiliza una corriente de electrones a alta velocidad dirigida hacia la superficie de la pieza de trabajo para remover material mediante fusión y vaporización.

La fig. 36 contiene un esquema del proceso EBM. Un cañón de haz de electrones genera una corriente continua de electrones que se aceleran a aproximadamente tres cuartos de la velocidad de la luz y se enfocan a través de una lente electromagnética sobre la superficie de la pieza. El lente es capaz de reducir el área del haz a un diámetro tan pequeño como 0,025 mm.

Al chocar contra la superficie, la energía cinética de los electrones se convierte en energía térmica de una densidad muy alta, la cual funde o vaporiza el metal en un área localizada. El EBM debe realizarse en una cámara de vacío para eliminar la colisión de los electrones con las moléculas de gas.

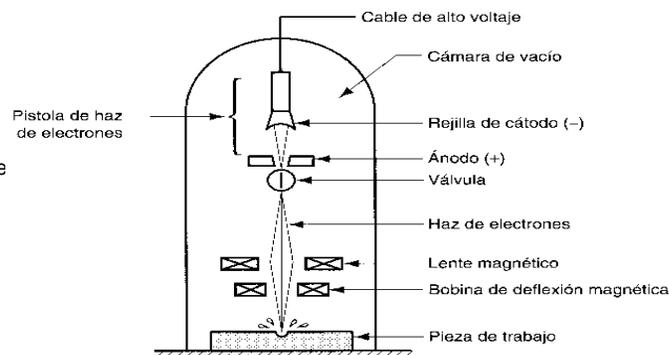


FIGURA 36. Maquinado con haz de

FIGURA 36. Maquinado con haz de electrones (EBM).

El maquinado con haz de electrones se usa para diversas aplicaciones de corte de alta precisión sobre cualquier material conocido. Las aplicaciones incluyen el taladrado de orificios de diámetro muy pequeño, de hasta 0,05 mm de diámetro; taladrado de orificios, cuya relación entre profundidad y diámetro sea muy alta, mayores que 100:1, y el corte de ranuras con un ancho de 0,025 mm.

Estos cortes pueden hacerse con tolerancias muy pequeñas sin fuerzas de corte ni desgaste de herramientas. El proceso es ideal para el micro maquinado y por lo general se limita a operaciones de corte en partes delgadas en el rango de 0,25 a 6,3 mm de espesor. Otras limitaciones o desventajas del maquinado con haz de electrones son la necesidad de realizar el proceso al vacío, la alta energía requerida y el equipo que es costoso.

3.3.3. Maquinado con rayo láser

Los láseres se han usado para diversas aplicaciones industriales que incluyen el tratamiento térmico, la soldadura y la medición, así como en los procesos de marcado, taladrado y corte (los cuales se describirán aquí. El término *láser* está formado por las siglas en inglés de "amplificación luminosa de emisiones de radiación estimulada" (*light amplification of simulated emission of radiation*).

Un láser es un transductor óptico que convierte energía eléctrica en un haz luminoso altamente coherente. Un rayo láser tiene varias propiedades que lo distinguen de otras formas de luz. Es monocromático (en teoría, la luz tiene una longitud de onda única) y muy alineado -los rayos de luz en el haz están casi perfectamente paralelos.

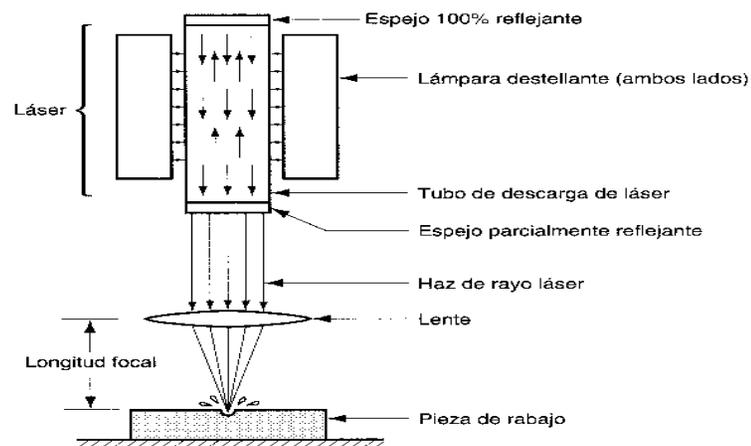


FIGURA 37. Maquinado con rayo láser (LBM).

Estas propiedades permiten enfocar la luz generada por un láser, mediante lentes ópticos convencionales, sobre un punto muy pequeño, produciendo densidades muy potentes. Dependiendo de la cantidad de energía que contiene el rayo de luz y su grado de concentración en el punto, se realizan diversos procesos industriales.

El maquinado por rayo láser, MRL (en inglés LBM), usa la energía luminosa de un láser para remover material mediante vaporización y desgaste. La instalación para el LBM se ilustra en la fig. 37. Los tipos de láser usados en este proceso son de gas de dióxido de carbono y los de estado sólido (de los cuales hay varios tipos).

En el maquinado por rayo láser, se concentra la energía del rayo de luz coherente no sólo en forma óptica, sino también en términos de tiempo. El rayo de luz se dirige para que la energía liberada produzca un impulso contra la superficie de trabajo, y a su vez una combinación de evaporación y fusión, dando como resultado la salida rápida del material fundido de la superficie de la pieza.

El maquinado por rayo láser se usa para realizar diferentes tipos de operaciones de taladrado, corte en tiras, ranurado, graficado y marcado. Es posible obtener un taladrado con orificios de diámetro pequeño, hasta de 0,025 mm. Para orificios más grandes, cuyo diámetro es superior a 0,50 mm, el rayo láser se controla para cortar el contorno del orificio.

El maquinado por rayo láser no se considera un proceso de producción masiva y, generalmente, se usa en materias primas delgadas. El rango de materiales de trabajo que se pueden maquinar mediante este proceso es virtualmente ilimitado. Las propiedades ideales de un material para LBM incluyen una alta absorción de energía luminosa, baja reflectividad, buena conductividad térmica, baja temperatura específica, baja temperatura de fusión y baja temperatura de evaporación.

Por supuesto, ningún material posee esta combinación ideal de propiedades. La lista real de materiales de trabajo procesados mediante LBM incluye metales con alta dureza y resistencia, metales blandos, cerámica, vidrio y cristal, epóxico, plástico, goma, textiles y madera.

3.3.4. Procesos de corte con arco eléctrico

En este proceso se usa el intenso calor que proviene de un arco eléctrico para fundir virtualmente cualquier metal para soldar o cortar. Casi todos los procesos de corte usan el calor generado por un arco entre un electrodo y una pieza metálica (por lo general una placa o lámina plana) para fundir un canal que separa la pieza. Los procesos de corte con arco eléctrico más comunes son:

- 1) el corte con plasma de arco y
- 2) el corte con electrodo de carbón y aire.

Corte con arco de plasma: Un plasma se define como un gas súper calentado eléctricamente y ionizado. El corte con *arco de plasma*, CAP (en inglés PAC), usa una corriente de plasma que opera a altas temperaturas situadas en el rango de 10.000 a 14.000 °C, para cortar metal por fusión. En la acción de corte se dirige la corriente de plasma rápidamente hacia la pieza, esta misma acción funde e impulsa el metal fundido por el canal.

Las características generales del corte con arco de plasma se ilustran en la fig. 38. El arco del plasma se genera entre un electrodo (dentro del soplete) y la pieza de trabajo o ánodo. El plasma fluye a través de una boquilla enfriada por agua, que controla y dirige la corriente a la posición deseada de la pieza. El chorro de plasma resultante es una corriente de alta velocidad bien alineada con temperaturas extremadamente altas en su centro, y con el calor suficiente para cortar a través de un metal, que en algunos casos tiene un espesor de 150 mm.

Los gases usados para crear el plasma con PAC incluyen el nitrógeno, el argón con hidrógeno o una mezcla de todos estos. Tales fluidos se denominan los gases primarios en el proceso. Con frecuencia se dirigen gases secundarios o agua para rodear el chorro de plasma, como se muestra en la figura, a fin de ayudar a confinar el arco y limpiar el canal de metal fundido para evitar la acumulación de éste último.

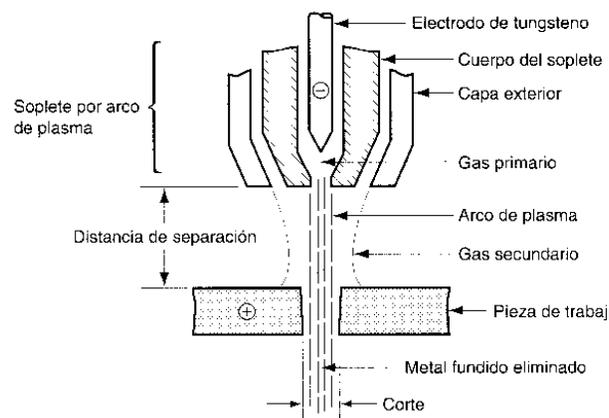


FIGURA 38. Corte con arco de plasma.

La mayoría de las aplicaciones del PAC implican el corte de láminas de metal y placas planas. Las operaciones incluyen el corte a lo largo de una trayectoria definida. La trayectoria definida se corta ya sea mediante un soplete manual controlado por una persona o dirigiendo la trayectoria del corte del soplete bajo control numérico, CN (en inglés NC). Para una producción más alta y rápida se prefiere el NC, debido a que se supervisan mejor las variables más importantes del proceso, tales como la distancia de separación y la velocidad de alimentación. El corte con plasma de arco se usa para cortar casi cualquier metal eléctricamente conductor.

Con frecuencia los metales cortados mediante PAC incluyen aceros al carbono simple, el acero inoxidable y el aluminio. En estas aplicaciones, la ventaja del corte con plasma de arco sobre el NC es la alta productividad. Las velocidades de alimentación a lo largo de la trayectoria de corte pueden ser tan altas como 180 mm/seg. para una placa de aluminio de 6,35 mm, y de 85 mm/seg. para una placa de acero de 6.35 mm.

Para materiales más gruesos, las velocidades de alimentación deben reducirse. Por ejemplo, la velocidad de alimentación máxima para cortar materia prima de aluminio de 100 mm de espesor es de alrededor de 8,5 mm/seg). Las desventajas del corte con arco de plasma son:

- 1) la superficie de corte es áspera y
- 2) el daño metalúrgico en la superficie es el más severo entre los procesos metalúrgicos no tradicionales.

Corte con electrodo de carbono y aire: En este proceso, el arco se genera entre un electrodo de carbono y un metal, y se usa un chorro de aire a alta velocidad para alejar la parte fundida del metal. Este procedimiento se usa con el propósito de formar un canal para separar la pieza o para formar una cavidad en la pieza.

La cavidad prepara los bordes de las placas para soldadura, por ejemplo, para crear un surco en forma de U en una junta empalmada. El corte con electrodo de carbón y aire se usa en diversos metales, incluyendo el hierro forjado, acero al carbono, las aleaciones bajas y el acero inoxidable, así como diversas aleaciones no ferrosas. La salpicadura del metal fundido es un riesgo y una desventaja del proceso.

Otros procesos de corte con arco: Otros procesos de arco eléctrico se utilizan para aplicaciones de corte, aunque no con tanta frecuencia como el corte con plasma de arco o con electrodo de carbón y aire. Estos otros procesos incluyen:

- 1) el corte de metal con arco eléctrico y gas,
- 2) el corte con arco protegido,
- 3) el corte con arco eléctrico por tungsteno y gas y
- 4) el corte con arco de carbono.

Las tecnologías son las mismas que se usan en la soldadura de arco, excepto que el calor del arco eléctrico se usa para cortar.

3.3.5. Procesos de corte con oxígeno y gas combustible

Una familia de procesos de corte térmico de uso muy difundido, conocida como el *corte con flama*, usa el calor de combustión de ciertos gases combinado con la reacción exotérmica del metal con el oxígeno. El soplete de corte que se usa en estos procesos está diseñado para proporcionar una mezcla de gas combustible y oxígeno en las cantidades correctas y dirigir una corriente de oxígeno a la región de corte.

El mecanismo principal de la remoción de material en el corte con oxígeno y gas combustible (en inglés OFC) es la reacción química del oxígeno con el metal base. El propósito de la combustión del oxígeno y el gas es elevar la temperatura en la región de corte para soportar la reacción. Normalmente, estos procesos se usan para cortar placas metálicas ferrosas, en las cuales ocurre una rápida oxidación del hierro de acuerdo con las reacciones siguientes:



La segunda de estas reacciones, es la más importante en términos de generación de calor.

El mecanismo de corte para metales no ferrosos es distinto en cierta forma. En general, estos metales se caracterizan por temperaturas de fusión más bajas que los metales ferrosos y hay más resistencia a la oxidación.

En estos casos, el calor de la combustión de la mezcla de oxígeno y gas combustible tiene una función más importante en la creación del canal. Asimismo, para promover la reacción de oxidación del metal, con frecuencia se añaden flujos químicos o polvos metálicos a la corriente de oxígeno.

Los combustibles usados en el OFC incluyen el acetileno (C_2H_2), el MAPP (metilacetilenopropadieno, C_3H_4), el propileno (C_3H_6) y el propano (C_3H_8). El acetileno arde a la máxima temperatura de flama y es el combustible de mayor uso para soldar y cortar. Sin embargo, deben considerarse ciertos riesgos con el almacenamiento y manejo del acetileno.

Los procesos de OFC se realizan en forma manual o con máquina. Los sopletes operados en forma manual se usan para trabajo de reparación, corte de metal desechado, adalgazamiento de protuberancias de fundición en arena y en operaciones similares que generalmente requieren una mínima precisión.

Para trabajo de producción, el corte con una flama de máquina permite velocidades mayores y una mejor precisión. Con frecuencia, este equipo se controla en forma numérica para permitir que se corten formas perfiladas.

3.4. MAQUINADO QUÍMICO

El maquinado químico, MQ (en inglés CHM), es un proceso no tradicional en el cual ocurre una remoción de materiales mediante el contacto con sustancias de ataque químico fuerte. Las aplicaciones dentro del proceso industrial empezaron poco después de la Segunda Guerra Mundial en la industria de las aeronaves.

El uso de materiales químicos para remover secciones no deseadas de una parte de trabajo se aplica en varias formas y se han desarrollado términos distintos para diferenciar las aplicaciones. Estos términos incluyen el fresado químico, el cortado químico, el grabado químico y el maquinado fotoquímico (en inglés PCM). Todos emplean el mismo mecanismo de remoción de material y es conveniente analizar las características generales del maquinado químico antes de definir los procesos individuales.

3.4.1. Mecánica y química del maquinado químico

El proceso de maquinado químico consta de varios pasos. Las diferencias en las aplicaciones y las secuencias en que se realizan las etapas establecen las diferentes formas del CHM. Los pasos son los siguientes:

- 1) *Limpieza*. El primer paso es una operación de limpieza para asegurar que el material se remueva en forma uniforme de las superficies que se van a atacar.
- 2) *Enmascarado*. Un recubrimiento protector se aplica a ciertas zonas de la pieza. Este protector está hecho de material químicamente resistente al material de ataque químico (el término *resistente* se usa para el material protector). Por lo tanto, solamente se aplica a aquellas porciones de la superficie de trabajo que no se van a atacar.
- 3) *Ataque químico*. Éste es el paso de remoción de material. La pieza se sumerge en un material de ataque químico que afecta aquellas porciones de la superficie de la pieza que no están protegidas. En el método normal de ataque, el material de trabajo (por ejemplo, un metal) se convierte en una sal que se disuelve dentro del material de ataque químico, y posteriormente se remueve de la superficie. Una vez que se ha removido el material, se retira la pieza del material de ataque químico y se enjuaga para detener el proceso.
- 4) *Desenmascarado*. Se retira el protector de la pieza.

En el maquinado químico, los dos pasos que implican variaciones significativas en los métodos, materiales y parámetros del proceso son los pasos 2) y 3), el enmascarado y el ataque químico.

Los materiales protectores incluyen el neopreno, el cloruro de polivinilo, el polietileno y otros polímeros. La protección se consigue por alguno de estos tres métodos:

- 1) cortar y desprender,
- 2) resistente fotográfico y
- 3) resistente de pantalla.

El método de *cortar y desprender* implica la aplicación del protector sobre toda la pieza, ya sea por inmersión, recubrimiento o rocío. El espesor del protector resultante es de 0,025 a 0,125 mm. El protector (ya endurecido) se corta mediante una navaja para marcar y se desprende de las áreas de la superficie que se van a atacar. La operación de corte del protector se realiza a mano, generalmente guiando la navaja con una plantilla.

El método de cortar y desprender se usa para la manufactura de piezas grandes, cantidades de producción bajas y donde la precisión no es un factor crítico. Este método no soporta tolerancias más estrechas que $\pm 0,125$ mm, excepto que la técnica se realice con extremo cuidado.

Como indica su nombre, el método de *resistente fotográfico* (el cual se abrevia como *foto resistente*), usa técnicas fotográficas para realizar el paso de enmascarado. Los materiales enmascarados contienen químicos fotosensibles. Éstos se aplican a la superficie de trabajo, y la pieza recubierta se expone a la luz a través de una imagen en negativo de las áreas que se van a atacar.

Posteriormente, las áreas protegidas se retiran de la superficie usando técnicas de revelado fotográfico. Este procedimiento deja con material protector la superficie deseada de la pieza y sin protección las áreas restantes que son vulnerables al ataque químico. Posteriormente, las áreas protegidas se retiran de la superficie usando técnicas de revelado fotográfico.

Por lo general las técnicas de enmascarado foto resistente se aplican donde se producen partes pequeñas en grandes cantidades y se requiere una mínima tolerancia. Esta técnica soporta tolerancias menores que $\pm 0,013$ mm.

El método *resistente de pantalla* aplica el protector mediante métodos de sangrarla. En estos métodos, el protector se aplica sobre la superficie de la pieza mediante una malla de seda o acero inoxidable. La malla tiene incorporado un estencil que protege la aplicación con barniz protector y deja expuestas las áreas que se van a atacar.

Por lo tanto, el protector recubre las áreas de trabajo que no se van a atacar. En general, el método resistente de pantalla se usa en aplicaciones que están entre los otros dos métodos de enmascarado en términos de precisión, tamaño de partes y cantidades de producción. Con el método de enmascarado se obtienen tolerancias de $\pm 0,075$ mm.

La elección del material de *ataque químico* depende del material de trabajo que se va a atacar, la profundidad y la velocidad de remoción de material deseado, así como los requerimientos de acabado externo. El material de ataque químico también debe combinarse con un protector compatible para asegurar que dicho agente no afecte al protector.

La tabla 4 enlista algunos de los materiales de trabajo que se procesan bajo el método de CHM, junto con los materiales de ataque químico que se usan para estos materiales. La tabla también incluye una velocidad de penetración y factores de ataque químico. Estos parámetros se explican enseguida.

La rapidez de remoción de material en el CHM por lo general se indican como velocidades de penetración en mm/min, dado que la velocidad de ataque químico sobre el material de trabajo se dirige a la superficie. El área de la superficie no afecta la velocidad de penetración. Las velocidades de penetración enlistadas en la tabla 4 son valores normales para determinados materiales de trabajo y sus correspondientes agentes de ataque químico.

Material de la pieza	Material de ataque químico	Velocidades de penetración mm/min	Factor de ataque químico
Aluminio y aleaciones	FeCl ₃ NAOH	0,020 0,025	1,75
Cobre y aleaciones	FeCl ₃	0,050	2,75
Magnesio y aleaciones	H ₂ SO ₄	0,038	1,0
Silicio	HNO ₃ : HF : H ₂ O	Muy lento	ND
Acero bajo carbono	HCl : HNO ₃ FeCl ₃	0,025	2,0
Titanio y aleaciones	HF HF: HNO ₃	0,025	1,0

TABLA 4. Materiales de trabajo y de ataque químico comunes en el maquinado químico, con velocidades de penetración normales en el trabajo.

Las profundidades de corte en el maquinado químico tienen hasta 12,5mm para paneles de aeronaves hechos de placas metálicas. Sin embargo, muchas aplicaciones requieren profundidades de sólo algunas milésimas de mm. Junto con la penetración en el trabajo, también ocurre un ataque químico en las regiones laterales situadas bajo el protector, como se ilustra en la fig. 39.

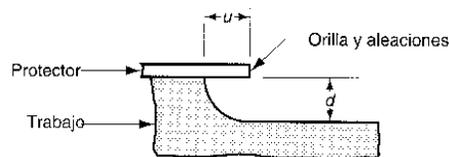


FIGURA 39. Excedente de corte en el maquinado químico.

Este efecto se denomina el excedente de corte, y debe considerarse durante el diseño de la máscara para producir un corte que tenga las dimensiones especificadas. Para determinado material de trabajo, el excedente de corte se relacionará directamente con la profundidad del corte. La constante de proporcionalidad para el material se llama *factor de ataque químico*, y se define como:

$$F_e = \frac{u}{d} \quad (20)$$

en donde Fe = factor de ataque químico; u = excedente de corte, en mm) y d = profundidad de corte, en mm. Las dimensiones u y d se definen en la fig. 39. En el maquinado químico, diferentes materiales de trabajo tienen distintos factores de ataque químico. Algunos valores típicos se presentan en la tabla 4. El factor de ataque químico se usa para determinar las dimensiones de las áreas de corte en el protector, y así obtener las dimensiones especificadas sobre las áreas atacadas de la pieza.

3.4.2. Procesos de maquinado químico

En esta sección, describiremos los principales procesos de maquinado químico, los cuales son:

- 1) el fresado químico,
- 2) el cortado químico,
- 3) el grabado químico y
- 4) el maquinado fotoquímico.

Fresado químico. El fresado químico fue el primer proceso de CHM que se comercializó. Durante la Segunda Guerra Mundial, una compañía de aeronaves de Estados Unidos empezó a usar dicho proceso para remover el metal de algunos componentes de las aeronaves, al cual denominaron fresado químico. La referencia de este proceso se tiene de los procesos de Chem-mill. Actualmente, el fresado químico todavía se utiliza ampliamente en la industria aeronáutica para retirar material de las alas y el fuselaje, con el propósito de reducir el peso.

El método es aplicable a partes grandes, de las cuales se retiran cantidades sustanciales de metal durante el proceso. Se emplea el método de protección de corte y desprendimiento. Por lo general se usa una plantilla, que toma en cuenta el excedente de corte que se producirá durante el ataque químico. La secuencia de los pasos del procesamiento se ilustra en la fig. 30.

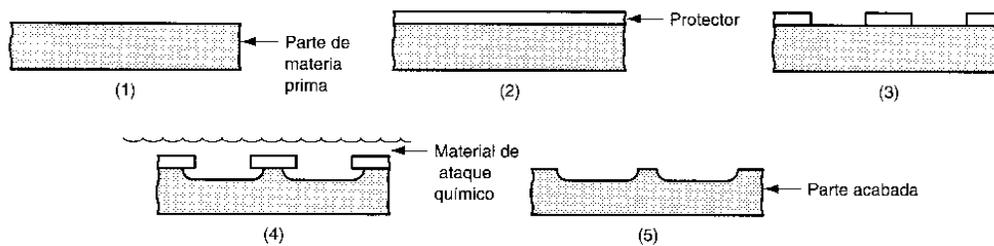


FIGURA 30. Secuencia de pasos en el procesamiento por fresado químico: 1) limpiar una parte de materia prima, (2) aplicar el protector, (3) marcar, cortar y desprender el protector de las áreas que se van a atacar, (4) atacar con material químico y (5) remover el protector y limpiar para producir una parte acabada.

El fresado químico produce un acabado de superficie que varía con cada material de trabajo. La tabla 5 proporciona una muestra de los valores. El acabado de la superficie depende de la profundidad de penetración. Conforme aumenta la profundidad, empeora el acabado, acercándose al límite superior de los rangos que proporciona la tabla. El daño metalúrgico del fresado químico es muy pequeño, tal vez de alrededor de 0,005 mm dentro de la superficie de trabajo.

Material de trabajo	Rango de acabado externo (μm)
Aluminio y aleaciones	1,8-4,1
Magnesio	0,8-1,8
Acero blando	1,8-4,1
Titanio y aleaciones	0,4-2,5

TABLA 5. Acabado de superficie esperado en el fresado químico.

Cortado químico: El cortado químico usa la erosión química para cortar partes de láminas metálicas muy delgadas, con un espesor de hasta 0,025 mm o para patrones de corte complicados. En ambos ejemplos, los métodos convencionales para perforado y troquelado no funcionan, debido a que las fuerzas de troquelado pueden dañar las láminas metálicas, además, el costo de habilitación de herramientas es muy alto. El cortado químico produce partes sin rebabas y aventaja a otras operaciones convencionales de corte.

Los métodos que se usan para aplicar el protector en el cortado químico son el foto resistente o el resistente de pantalla. Para patrones de corte pequeños o complicados, así como para tolerancias reducidas, se usa el método foto resistente; de lo contrario, se usa el método resistente de pantalla. Cuando el tamaño de la pieza de trabajo es pequeño, el cortado químico excluye el método de corte y desprendimiento del protector.

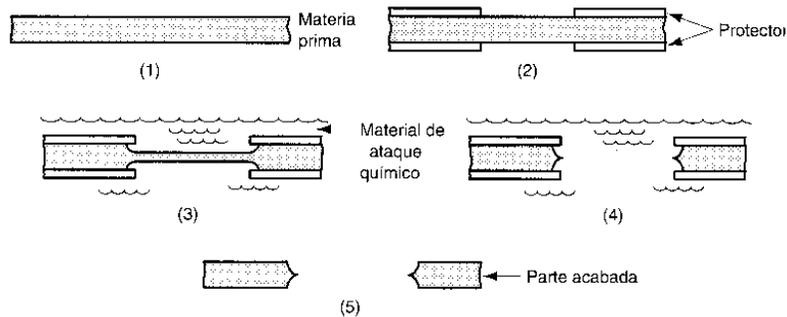


FIGURA 31. Secuencia de pasos en el procesamiento por cortado químico: (1) limpieza de la parte, (2) aplicación de un resistente (protector) a través de la pantalla, (3) ataque con un material químico (parcialmente terminado), (4) ataque con un material químico (terminado), (5) remoción del protector y limpieza para producir una parte terminada.

Usando como ejemplo el método resistente de pantalla, la fig. 31 muestra los pasos en el cortado químico. Dado que en este proceso el ataque químico ocurre en ambos lados de la pieza, es importante que el procedimiento de enmascarado proporcione un registro preciso entre los dos lados. De lo contrario, la erosión de la parte no podrá alinearse desde direcciones opuestas. Esto es sumamente importante con partes de tamaño pequeño y patrones complicados.

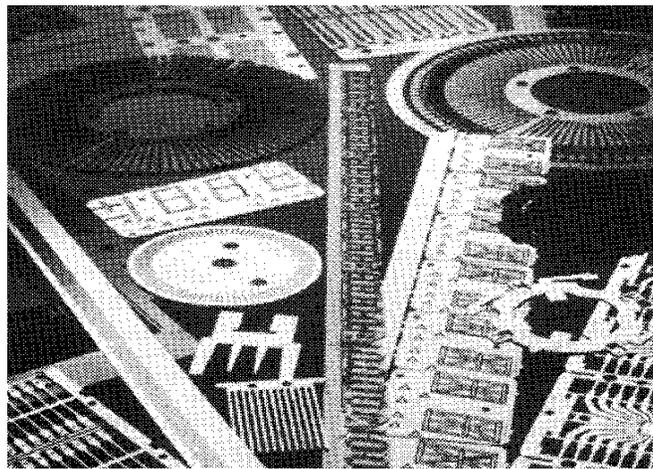


FIGURA 32. Partes hechas mediante cortado químico.

Por las razones expuestas, la aplicación del cortado químico se limita a materiales delgados o patrones complicados. El grosor máximo de la materia prima es de alrededor de 0,76 mm. Asimismo, es posible procesar materiales endurecidos y frágiles mediante el cortado químico, que sería imposible por métodos mecánicos porque seguramente se fracturaría la pieza.

La fig.32 presenta una muestra de partes manufacturadas por medio del proceso de cortado químico. Cuando se utiliza el método foto resistente para enmascarar, pueden mantenerse tolerancias tan reducidas como $\pm 0,0025$ mm sobre materiales que tengan un espesor tan pequeño como 0,025 mm.

Conforme aumenta el espesor de la materia prima, deben permitirse tolerancias más amplias. Los métodos de enmascarado con resistente de pantalla no son tan precisos como el foto resistente. De acuerdo con esto, cuando se requieren tolerancias mínimas en la pieza, debe usarse el método foto resistente para realizar el paso de enmascarado.

Grabado químico: El grabado químico es un proceso de maquinado químico para hacer placas con nombres y otros paneles planos que tienen letras o dibujos en un lado. De otra forma, estas placas y paneles se harían usando una máquina convencional de grabado o un proceso similar. El grabado químico se usa para hacer paneles con las letras hundidas o elevadas, con solo invertir las partes del panel a las que se va a aplicar el ataque químico.

El enmascarado se hace con el método foto resistente o el resistente de pantalla. La secuencia de grabado químico es similar a la de otros procesos de CHM, excepto que después del ataque con material químico se hace una operación de rellenado. El propósito del rellenado es aplicar pintura u otra protección en las áreas hundidas formadas por el material de ataque químico. Después, el panel se sumerge en una solución que disuelve el protector pero no ataca el material de recubrimiento. Por lo tanto, cuando se retira el protector, el recubrimiento permanece en las áreas atacadas, resaltando el patrón.

Maquinado fotoquímico: En el maquinado fotoquímico, MF (en inglés PCM), se usa el método de foto resistente para enmascarar. Por lo tanto, el término se aplica correctamente al cortado químico y al grabado químico cuando estos métodos usan resistente fotográfico. El PCM se emplea en el procesamiento de metales cuando se requieren tolerancias mínimas o patrones complicados sobre partes planas.

Los procesos fotoquímicos también se usan ampliamente en la industria de la electrónica para producir diseños de circuitos complicados sobre plantillas de semiconductores. Esta tecnología hace posible una integración a un escala muy grande en la microelectrónica.

La fig. 33 muestra la secuencia de pasos en el maquinado fotoquímico, cuando éste se aplica al cortado químico. Hay varias formas de exponer fotográficamente la imagen deseada sobre el protector. La figura muestra el negativo en contacto con la superficie del protector durante la exposición. Ésta es una impresión de contacto, pero se cuenta con otros métodos de impresión fotográfica que exponen el negativo a través de un sistema de lentes para ampliar o reducir el tamaño del patrón impreso en la superficie del protector.

Los materiales fotoprotectores de uso actual son sensibles a la luz ultravioleta, pero no a la luz de otras longitudes de onda. Por lo tanto, con una iluminación adecuada en la fábrica, no es necesario realizar los pasos del procesamiento en un ambiente de cuarto oscuro. Una vez que se efectúa la operación de enmascarado, los pasos restantes del procedimiento son similares a los de otros métodos de maquinado químico.

En el maquinado fotoquímico, el término que corresponde al factor de ataque químico es *anisotropía*, la cual se define como la profundidad del corte d dividida entre el excedente de corte u (véase fig. 39). Es el valor recíproco del factor de ataque químico, definido en la ecuación (20). En forma de ecuación,

$$A = 1 / F_e = d / u \quad (21)$$

donde A = grado de anisotropía; F_e = factor de ataque químico; d = profundidad de corte; y u excedente de corte.

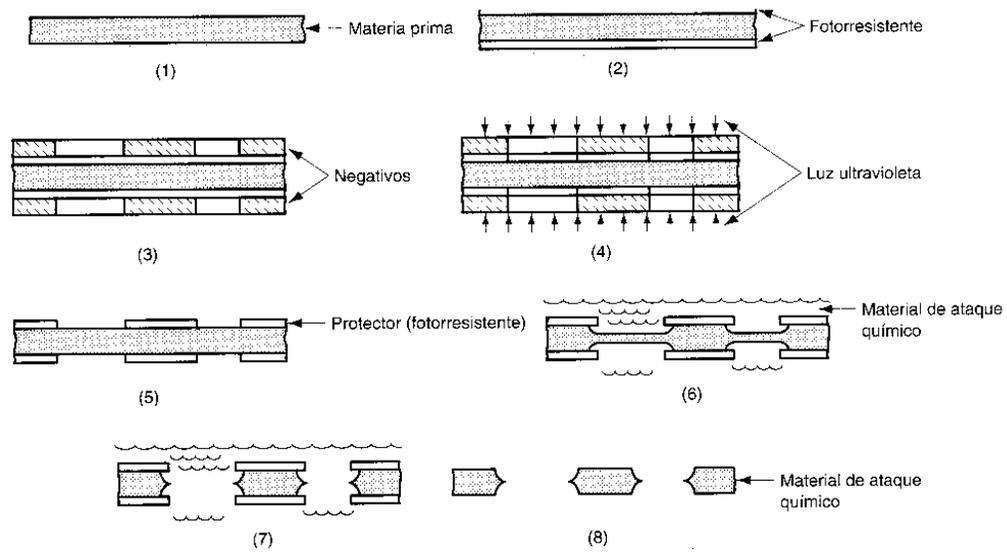


FIGURA 33. Secuencia de pasos de procesamiento en el maquinado fotoquímico: (1) limpiar una parte de materia prima, (2) aplicar un resistente (protector) por inmersión, pulverización o pintura, (3) colocar un negativo sobre el protector, (4) exponer a una luz ultravioleta, (5) revelar para remover el protector sólo en las áreas que se van a atacar, (6) atacar con un material químico (se muestra un efecto parcial), (7) atacar con un material químico (efecto terminado) y (8) remover el protector y limpiar para producir una parte terminada.