CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

Los estándares de hoy en día exigen que los procesos de maquinado sean cada vez más precisos y de mayor calidad en el acabado. Esto ha llevado a la incursión de nuevas tecnologías en los últimos años, tal como lo es el Control Numérico Computarizado (CNC) y los dispositivos para determinar rápidamente la calidad del maquinado (rugosímetros). La incursión de estas nuevas tecnologías y dispositivos ha hecho posible que el proceso se lleve a cabo de una manera más rápida, segura y con productos de mayor calidad final.

Sin embargo, el proceso del maquinado se ve afectado por diversas variables que pueden llegar a alterar el acabado final del trabajo. Entre estas variables se encuentra la temperatura generada. Esta temperatura puede llegar a ser un problema, dado que puede alterar las condiciones normales de trabajo del maquinado.

En la presente tesis, se propone estudiar el comportamiento de la temperatura durante el proceso de maquinado, para tratar de encontrar una relación con la calidad del acabado o rugosidad.

Para la total comprensión tanto del fenómeno temperatura así como del maquinado y la rugosidad, se tratan primeramente los aspectos teóricos y fundamentos del CNC y la rugosidad para después realizar un análisis de la temperatura concerniente a las máquinas-herramienta. Una vez comprendido esto, se llevará a cabo el trabajo experimental y el análisis de los resultados, para poder llegar a conclusiones que ayuden a tener una visión más clara de la influencia de la temperatura en el proceso del maquinado.

Debido a que las condiciones de este experimento son muy específicas, los resultados arrojados podrán mostrar un comportamiento específico de este tipo de maquinados, pero es posible que estos resultados no sean válidos para todas las condiciones de trabajo, ya que pueden existir variaciones en los demás parámetros.

El desarrollo de esta experimentación se llevó a cabo gracias a las facilidades en el uso de la instrumentación del departamento de maquinados de la Preparatoria Técnica Álvaro Obregón y del departamento de Máquinas-Herramientas, así como el uso de sus instalaciones, y al patrocinio del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

HIPÓTESIS

Se supone que obteniendo los parámetros óptimos de maquinado tomando en cuenta todas las variables críticas del proceso como son: temperatura generada, velocidad de corte y avance, tamaño y morfología de la viruta, acabado de la superficie maquinada y el material de la pieza, se logrará mejorar el proceso de corte en una máquina-herramienta.

OBJETIVOS

Obtener las variables óptimas que afectan la maquinabilidad en piezas de aleaciones metálicas comerciales con el propósito de obtener los valores mejorados de maquinado, en base a parámetros intrínsecos del material y asociados a la geometría del corte desarrollados en el centro de maquinado EMCO PC MILL 125 con el que cuenta la División de Ingeniería Mecánica en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Este trabajo pretende obtener las variables óptimas de velocidad de corte y el avance que den como resultado la eficientización de corte en una situación de maquinado en particular.

Implementar los conocimientos adquiridos en la maestría en cuanto a lo que se refiere a la utilización de equipos de manufactura, complementado con el conocimiento desarrollado con los equipos de Control Numérico Computarizado.

CAPÍTULO 2

TEORÍA DEL MAQUINADO DE METALES.

2.1 Maquinado de alta velocidad.

2.1.1 Introducción.

Iniciado el siglo XXI es prácticamente inimaginable la revolución experimentada por la tecnología de fabricación en los últimos 10 ó 15 años. La evolución de los ordenadores, de las nuevas tecnologías de comunicación, etc, están revolucionando el mundo en general y, en particular el mundo empresarial. En el campo que concierne a las máquinas-herramientas, maquinado-fresado, "*el cambio o la revolución*" ya ha llegado y, aunque todavía queda mucho camino por recorrer, el denominado Maquinado a Alta Velocidad (MAV) es ya una realidad que muchas empresas y mucha gente todavía desconocen.

El MAV hoy en día es una tecnología de corte con bases sólidas que abre las puertas del trabajo de materiales y figuras que antes no se podían maquinar mediante el trabajo convencional, como por ejemplo: materiales con una dureza superior a 50 HRC o paredes delgadas de 0.2 mm, etc.

2.1.2 ¿Qué es el maquinado de alta velocidad?

Actualmente, el MAV tiene muchas definiciones. Pero una cosa clara es que no significa obligatoriamente maquinar a altas revoluciones de husillo, ya que muchas de las aplicaciones se realizan con velocidades de husillo moderadas (3.000 - 6.000 rpm) y herramientas de gran diámetro (25 - 30 mm). Las condiciones del proceso (velocidad de corte, avance, profundidades de corte radial y axial, etc) dependerán del material a maquinar, así como de las máquinas y herramientas disponibles.

Cada material y aleación que se pretenda maquinar posee sus propias características de maquinabilidad, lo que marcará los límites operativos del proceso. Por ejemplo, no es lo mismo maquinar:

- Materiales blandos (aluminio, cobre, magnesio, etc.) que duros (aceros templados, titanio, níquel, etc.)
- Materiales de gran maquinabilidad (aluminio, magnesio,...) que de poca maquinabilidad (titanio, inconel, acero para herramientas, etc.).

Así, el triángulo material-herramienta-máquina limitará los parámetros de corte, estrategias de maquinado, volumen de material extraído por unidad de tiempo, etc. La velocidad de corte y las condiciones de proceso en general dependerán del material a maquinar. La figura 2.1 nos muestra los rangos de velocidades de corte en función del material maquinado.[1]

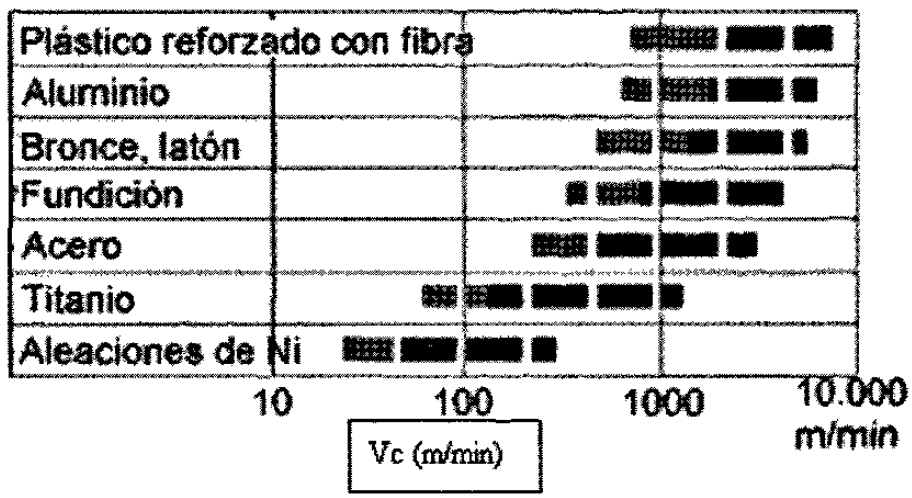

Figura 2.1 Rangos de velocidades de corte en función del material

El Maquinado de Alta Velocidad consiste en la optimización del maquinado con las posibilidades existentes limitado por la pieza/material a maquinar y las máquinas-herramientas (Diseño Asistido por Computadora/ Manufactura Asistida por Computadora (CAD/CAM) y Control Numérico Computarizado (CNC) disponibles). Esto puede suponer maquinar a velocidades de corte entre 5 y 10 veces superiores a las que se utilizan de manera convencional "para cada material".

Podemos considerar que con el Maquinado a Alta Velocidad se ha dado un paso importante hacia el maquinado óptimo de cada material. A medida que se vayan desarrollando y mejorando las máquinas, las herramientas, los programas de CAD-

CAM, los CNC, se irá avanzando hacia la optimización general del maquinado, en el que cada material tendrá sus condiciones propias de corte, sus estrategias, sus herramientas, etc.

El MAV es un nuevo mundo y una nueva forma de trabajar, que supone un cambio de mentalidad y necesidades: es una tecnología que no tiene nada que ver con el maquinado convencional. Como se muestra en las figuras 2.2 y 2.3.

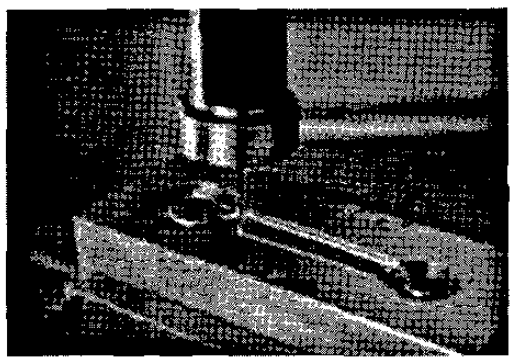

Figura 2.2 Maquinado de contorno CNC

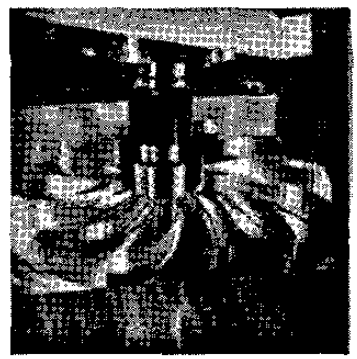

Figura 2.3 Maquinado de cara CNC

El MAV tiende a sustituir las pasadas de gran profundidad a baja velocidad de corte por muchas pasadas rápidas de menor profundidad de corte, obteniendo un considerable aumento de viruta desalojada (volumen de material por unidad de tiempo). Las altas velocidades de corte y los elevados avances disminuyen las fuerzas de corte gracias a espesores de viruta cada vez más pequeños.

Ventajas que ofrece el MAV [2]

- Disminución de las fuerzas de corte en los materiales dúctiles, posibilidad de maquinar paredes delgadas (0,2 mm).
- Mayor precisión de los contornos, mejor calidad superficial y tolerancias dimensionales más precisas.
- Reducción del tiempo de pulido.
- Maquinado de una sola atada para el desbaste y acabado.
- Maquinado de paredes finas.
- Reducción del tiempo de maquinado y costo global.
- Disminución del coeficiente de rozamiento viruta-herramienta.
- Evacuación casi total del calor por medio de la viruta.
- Aumento en la vida de la herramienta.
- Posibilidad de maquinado de aceros duros (>50 HRC) como si fuera maquinado en caliente.

2.2 Panorama general de la tecnología del maquinado.

El *maquinado* es un proceso de manufactura en el cual se usa una herramienta de corte para remover el exceso de material de una parte de trabajo, de tal manera que el material remanente sea la forma de la parte deseada. La acción predominante del corte involucra la deformación cortante del material de trabajo para formar una viruta; al removerse la viruta, queda expuesta una nueva superficie. El maquinado se aplica más frecuentemente para formar metales.[3]

El maquinado se puede aplicar a una amplia variedad de materiales de trabajo. Prácticamente todos los metales sólidos se pueden maquinar. Los plásticos y los compuestos plásticos se pueden cortar también por maquinado. Los cerámicos presentan dificultades debido a su alta dureza y fragilidad; sin embargo, la mayoría de los cerámicos se pueden cortar exitosamente mediante procesos de maquinado abrasivo. El maquinado se puede usar para generar cualquier forma geométrica regular, como superficies planas, agujeros redondos y cilindros. Combinando varias operaciones de maquinado en secuencia se pueden producir formas de complejidad y variedad ilimitada.

El maquinado puede producir dimensiones con tolerancias muy estrechas de menos de 0.025 mm. Siendo más preciso que muchos otros procesos.

El maquinado es capaz de crear acabados superficiales, muy tersos que pueden llegar a ser mejores que 0.4 mm. Algunos procesos abrasivos pueden lograr mejores acabados aún.

Debido a sus características, el maquinado se realiza generalmente después de otros procesos de manufactura como fundición o deformación volumétrica (por ejemplo, forjado y estirado de barras). Otros procesos crean la forma general de la parte y el maquinado produce la geometría final, las dimensiones y el acabado.

El maquinado no es solamente un proceso, sino una familia de procesos. La característica común es el uso de una herramienta de corte que forma una viruta, la cual se remueve de la parte de trabajo. Para realizar la operación, se requiere movimiento relativo entre la herramienta y el material de trabajo. Este movimiento relativo se logra en la mayoría de las operaciones de maquinado por medio de un movimiento primario, llamado la velocidad, y un movimiento secundario, denominado el avance. La forma de la herramienta y su penetración en la superficie del trabajo, combinada con estos movimientos, produce la forma deseada de la superficie resultante del trabajo, ver figura 2.4.

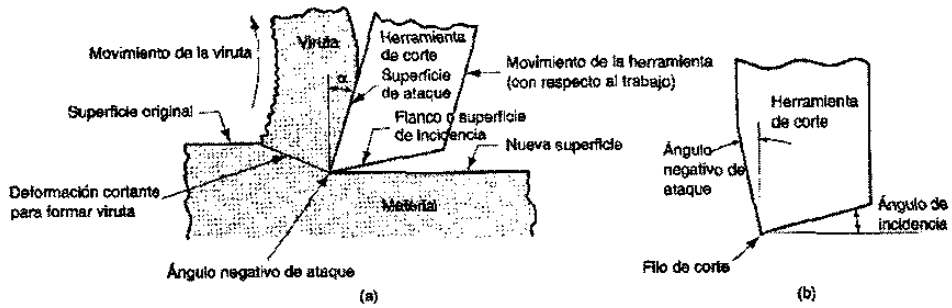

Figura 2.4 (a) Proceso de Torneado, (b) Herramienta de corte

2.2.1 Tipos de operaciones de maquinado.

Existen muchas clases de operaciones de maquinado, cada una de las cuales es capaz de generar una cierta geometría y textura superficial. Los tres tipos más comunes son: torneado, taladrado, y fresado, los cuales se ilustran en la figura 2.5.

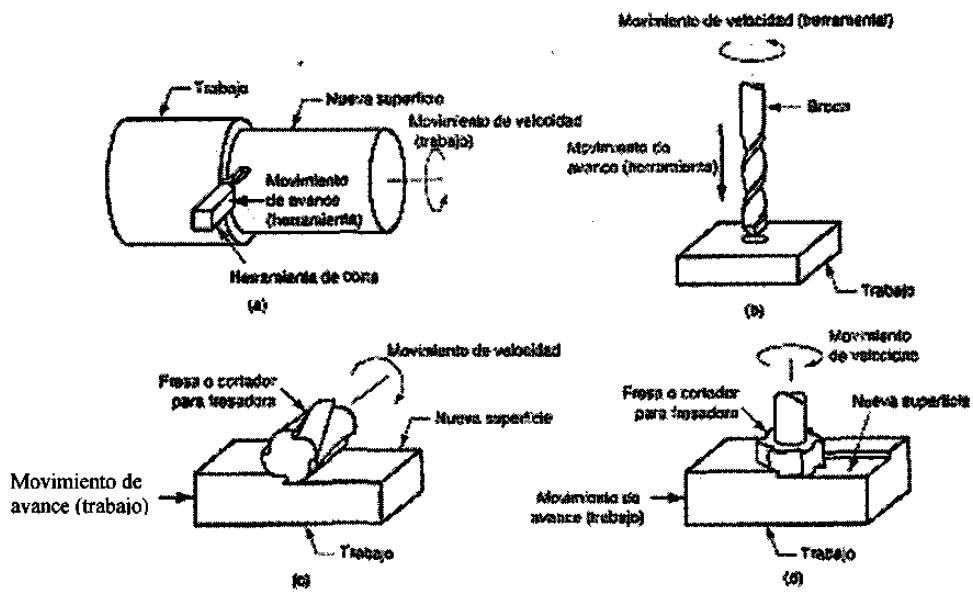

Figura 2.5 Los tres procesos más comunes de maquinado: (a) torneado, (b) taladrado y dos formas de fresado: (c) fresado periférico y (d) fresado de frente.

En el torneado se utiliza una herramienta de corte con un borde cortante simple destinado a remover material de una pieza de trabajo giratoria para dar forma a un cilindro. El movimiento de velocidad del torneado lo proporciona la parte de trabajo

giratoria y el movimiento de avance lo realiza la herramienta de corte, moviéndose lentamente en una dirección paralela al eje de rotación de la pieza de trabajo.

El taladrado se usa para crear un agujero redondo. Esto se realiza generalmente con una herramienta rotatoria que tiene dos filos cortantes. La herramienta avanza en una dirección paralela a su eje de rotación dentro de la parte de trabajo para formar el agujero redondo.

En el fresado, una herramienta rotatoria con múltiples filos cortantes se mueve lentamente sobre el material para generar un plano o superficie recta. La dirección del movimiento de avance es perpendicular al eje de rotación. El movimiento de velocidad lo proporciona la fresa rotatoria. Existen varias formas de fresado, siendo las dos básicas el fresado periférico y el fresado de frente.

Además del torneado, el taladrado y el fresado, existen otras operaciones convencionales que incluyen perfilado, cepillado, escariado y aserrado Otro grupo de procesos frecuentemente incluidos en la categoría del maquinado, son aquellos que utilizan abrasivos para cortar materiales. Estos procesos incluyen esmerilado y operaciones similares que se usan comúnmente para lograr acabados superficiales superiores de la parte de trabajo.

2.2.2 La herramienta de corte y portaherramientas para máquinas de alta velocidad.

Una herramienta de corte cuenta con uno o más filos cortantes. El filo cortante sirve para separar una viruta del material de trabajo, como se muestra en la figura 2.6. Ligadas al filo cortante existen dos superficies de la herramienta: la superficie de ataque y el flanco o superficie de incidencia. La superficie de ataque que dirige el flujo de la viruta resultante se orienta en cierto ángulo, llamado ángulo de ataque. El ángulo se mide con respecto a un plano perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. El ángulo de ataque puede ser positivo. El flanco de la herramienta provee un claro entre la herramienta y la superficie de la pieza de trabajo recién generada, de esta forma protege a la superficie de la abrasión que pudiera degradar el acabado. Esta superficie del flanco o de incidencia se orienta en un ángulo llamado ángulo de incidencia o de relieve.

Es muy importante el diseño de la herramienta debido al ambiente rudo en el que opera. Debe contar con la geometría apropiada para cortar efectivamente el material y debe fabricarse de un material más duro que el material de trabajo.

Existen dos tipos básicos cuyos ejemplos se muestran a continuación: (a) herramientas de punta sencilla y (b) herramientas de múltiples filos cortantes. Una herramienta de una sola punta tiene un filo cortante y se usa para operaciones como el

torneado. Una geometría típica para una herramienta de punta simple se ilustra en la figura 2.6(a). Durante el maquinado la punta de la herramienta penetra bajo la superficie original del trabajo. La punta está generalmente redondeada en cierto radio llamado el radio de la nariz.

Las herramientas de múltiples filos cortantes tienen más de un borde de corte y generalmente realizan su movimiento con respecto a la pieza de trabajo mediante rotación. El taladrado y el fresado utilizan herramientas rotatorias de múltiples filos cortantes. Existe una gran variedad en herramientas y sus geometrías. La figura 2.6(b) muestra una fresa helicoidal que se usa en fresado periférico. Aunque la forma es bastante diferente a la herramienta de punta simple, muchos de los elementos de la geometría son similares.

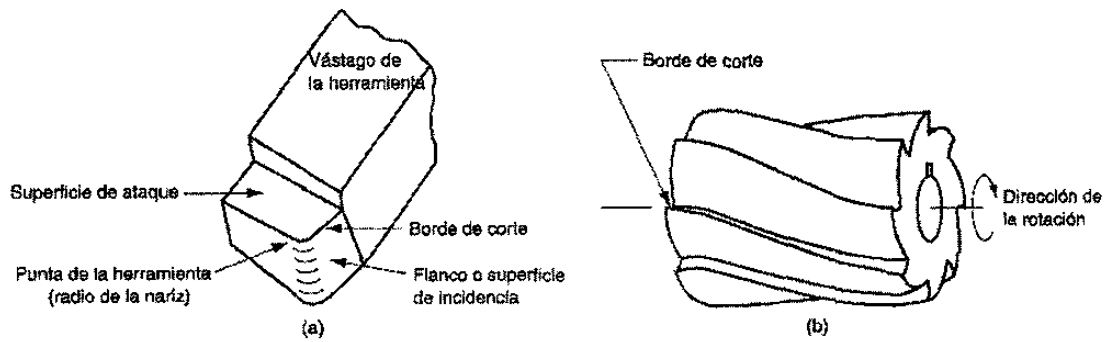

Figura 2.6 (a) Herramienta de punta sencilla, (b) Herramienta de múltiples filos cortantes

Portaherramientas para máquinas de alta velocidad. El maquinado de alta velocidad requiere altas precisiones de concentricidad de la herramienta de corte con el fin de evitar errores y aumentar la seguridad del proceso en el maquinado a altas revoluciones de corte. Actualmente los conos portaherramientas más utilizados son los especiales tipo HSK. También se utilizan los conos SK 40 & 50 (DIN 69871).

Las ventajas de los sistemas de amarre tipo HSK, frente a los portaherramientas más convencionales, se resumen en los siguientes puntos:

- Proporcionan mayores exactitudes de cambio y repetitividad.
- Transmisión segura de un elevado par con un posicionamiento radial definido (ausencia de *cabeceo*).
- Gran rigidez a la flexión estática y dinámica.
- Disminución del peso y de la longitud total, con lo que se disminuyen los problemas de tipo inercial.

2.2.3 Condiciones de corte.

Para realizar una operación de maquinado se requiere el movimiento relativo de la herramienta de trabajo. El movimiento primario se realiza a una cierta velocidad de corte v. Además, la herramienta debe moverse lateralmente a través del trabajo. Éste es un movimiento mucho más lento, llamado el avance f. La dimensión restante del corte es la penetración de la herramienta de corte de la superficie original del trabajo, llamada profundidad de corte d. Al conjunto de velocidad, avance y profundidad de corte se le llama condiciones de corte, ver figura 2.7. Éstas son las tres dimensiones del proceso de maquinado y, en ciertas operaciones (por ejemplo, la mayoría de las operaciones con herramientas de punta simple), se puede usar su producto matemático para obtener la velocidad de remoción de material del proceso:

$$MRR = vfd \tag{1}$$

donde MRR = velocidad de remoción de material en mm^3/seg.
v = velocidad de corte en mm/seg.
f = avance en mm/rev.
d = profundidad de corte en mm.

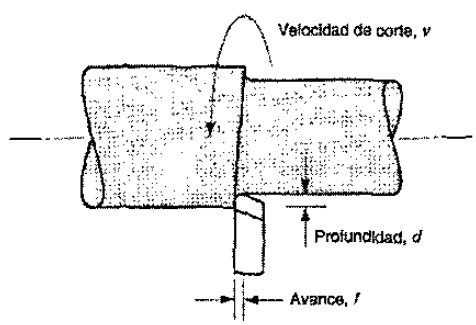

Figura 2.7 Condiciones de corte en el proceso de torneado

Las unidades típicas utilizadas para la velocidad de corte son mm/seg. El avance en torneado se expresa usualmente en mm/rev, y la profundidad de corte se expresa en mm. En otras operaciones de maquinado, estas unidades pueden ser diferentes. Por ejemplo, en la operación de taladrado la profundidad se interpreta normalmente como la profundidad del agujero taladrado.

Las operaciones de maquinado se dividen normalmente en dos categorías, distinguidas por el propósito y las condiciones de corte: cortes para desbaste primario (burdo) y cortes de acabado. Los cortes para desbaste primario se usan para remover grandes cantidades de material de la parte de trabajo inicial tan rápido como sea posible a fin de producir una forma cercana a la requerida, pero dejando algún material en la pieza para una operación posterior de acabado. Los cortes de acabado se utilizan para completar la parte y alcanzar las dimensiones finales, las tolerancias y el acabado de la superficie. En los trabajos de maquinado para producción se realizan uno o más cortes para desbaste, seguidos de uno o más cortes de acabado. Las operaciones para desbaste se realizan a altas velocidades y profundidades, algunos de los avances típicos van de 0.4 a 1.25 mm/rev y profundidades de 2.5 a 2.0 mm. Las operaciones de acabado se realizan a bajas velocidades de avance y a bajas profundidades, como son: 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 acabado.

Para enfriar o lubricar la herramienta de corte se aplica frecuentemente un fluido en la operación de maquinado, 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 maquinado.

Se utiliza una máquina-herramienta para sostener la parte de trabajo, para poner en posición la herramienta con respecto al trabajo y para proporcionar la potencia para el proceso de maquinado 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 maquinado, incluso el esmerilado. El término se aplica también frecuentemente a máquinas que realizar operaciones de formado de metal y prensado.

Las máquinas-herramienta convencionales son manejadas usualmente por un trabajador aunque las máquinas-herramienta modernas se diseñan frecuentemente para realizar sus procesos con un alto grado de automatización. Estas máquinas automáticas operan generalmente hasta una forma de control llamada control numérico. Ver tabla 1.

Tabla 1. Máquinas-herramientas convencionales usadas para las tres operaciones comunes de maquinado.

Operación	Máquina herramienta	Definiciones de velocidad, avance y profundidad
Torneado	Torno	La pieza gira a determinada velocidad. La herramienta avanza paralela al eje del trabajo. La profundidad de corte es la penetración de la herramienta en la superficie original del trabajo.
Taladrado	Prensa taladradora	La pieza se mantiene estacionaria. La herramienta gira y avanza paralelamente a su eje. El diámetro de la broca determina el diámetro del agujero. La profundidad de corte es la profundidad del agujero.
Fresado	Máquina fresadora	La herramienta gira a determinada velocidad. La pieza avanza en dirección perpendicular al eje de la herramienta. La profundidad de corte es la penetración de la herramienta debajo de la superficie original.

2.3 Teoría de la formación de viruta en el maquinado de metales.

La geometría de la mayoría de las operaciones de maquinado práctico son algo complejas, disponen de un modelo simplificado del maquinado que desprecia mucha de la complejidad geométrica y describe la mecánica de los procesos con buena precisión. Se le denomina modelo corte ortogonal. Aún cuando un proceso real de maquinado es tridimensional, el modelo ortogonal tiene solamente dos dimensiones que juegan un papel activo en el análisis.

2.3.1 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, ver figura 2.8 (b). Solamente el afilado borde de corte de la herramienta hace que ocurra una falla del material, como resultado, la viruta se separa del material original. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, por consiguiente, durante el maquinado se realiza el grueso del trabajo de corte.

La herramienta para corte ortogonal tiene solamente dos elementos geométricos, el ángulo de ataque y el ángulo del claro o de incidencia. Como se indicó previamente, el ángulo de ataque determina la dirección en la que fluye la viruta formada en la parte de trabajo, y el ángulo del claro 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 del trabajo. Ésta corresponde al espesor de la viruta antes de su formación t_0. Al formarse la viruta a lo largo del plano de corte incrementa su espesor a **t,** La relación de $\mathbf{t_0}$ a **t,** se llama relación del grueso de la viruta (o simplemente relación de viruta) r.

Como el espesor de la viruta después del corte siempre es mayor que el espesor correspondiente antes del corte, la relación de viruta siempre será menor a 1.0.

Además de $\mathbf{t_0}$, el corte ortogonal tiene una dimensión de anchura w, como se muestra en la figura 2.8, aun cuando esta dimensión no contribuye mucho al análisis en el corte ortogonal. La geometría del modelo de corte ortogonal nos permite establecer una relación importante entre el espesor de la viruta, el ángulo de ataque y el ángulo del plano de corte.

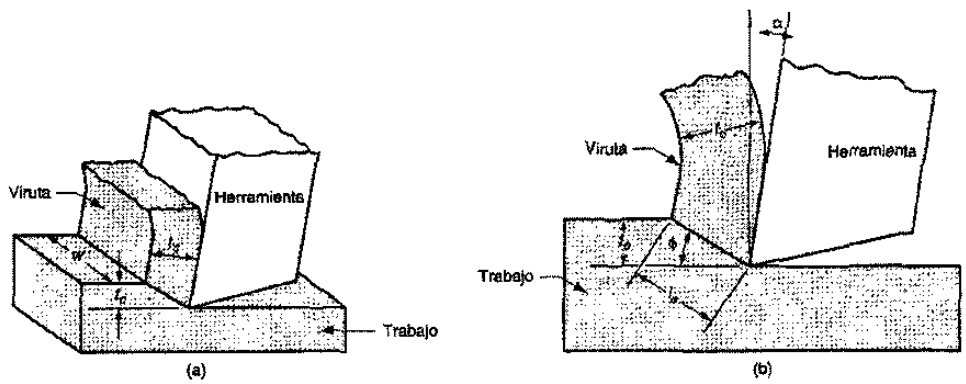

Figura 2.8 Corte Ortogonal: (a) Como un proceso tridimensional y (b) dos dimensiones en una vista lateral

La deformación cortante que ocurre a lo largo del plano de corte puede calcularse. La parte (a) de la figura 2.9 muestra la deformación cortante aproximada, en una serie de placas paralelas que se deslizan una contra otra para formar la viruta. De acuerdo con la definición de deformación cortante, cada placa experimenta la deformación mostrada en la figura 2.9.

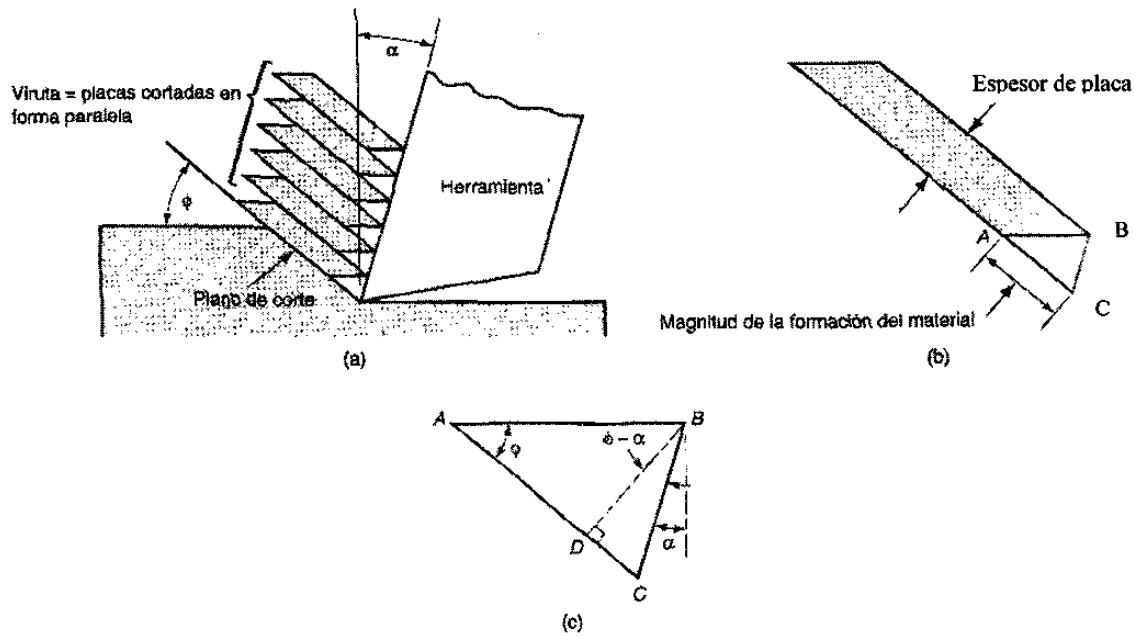

Figura 2.9 Deformación cortante

2.3.2 Formación real de viruta.

Debemos observar que hay diferencias entre el modelo ortogonal y el proceso de maquinado real. En primer lugar, el proceso de deformación cortante no ocurre sobre un plano. Si el corte tuviera lugar a través de un plano, ello implicaría que la acción de corte debería ocurrir instantáneamente al pasar a través del plano, en lugar de hacerlo en un periodo de tiempo finito (aunque breve). Para el material que se comporta en forma real, la deformación cortante debe ocurrir dentro de una zona delgada de corte, más que en un plano de espesor cero. Éste es el modelo más realista del proceso de deformación al corte en maquinado. Los experimentos de corte de metal han demostrado que el espesor de la zona de corte es solamente de pocas milésimas de pulgada. Como la zona de corte es tan delgada, en la mayoría de los casos no hay mucha pérdida de precisión si se supone como un plano.[4]

En segundo lugar, además de la deformación al corte que ocurre en la zona de corte, ocurre otra acción de corte en la viruta después de haber sido formada. Se refiere al corte adicional como corte secundario, para distinguirlo del corte primario. El corte secundario resulta de la fricción entre la viruta y la herramienta al deslizarse a lo largo

de la cara inclinada de esta última. Su efecto aumenta con incremento de la fricción entre la herramienta y la viruta. Las zonas de corte primario y secundario se pueden observar en la figura 2.10.

En la figura se muestra una visión más realista de la formación de viruta, mostrando la zona de corte más que el plano de corte. También se muestra la zona secundaria de corte como resultado de la fricción herramienta-viruta.

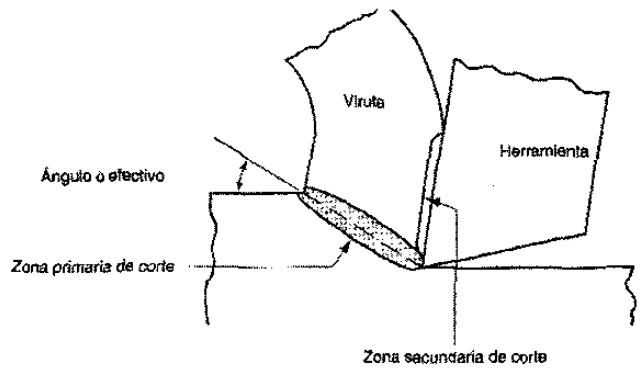

Figura 2.10 Forma de la viruta

En tercer lugar, la formación de la viruta depende del tipo de material que se maquina y de las condiciones de corte de la operación. Se pueden distinguir tres tipos básicos de viruta.

(a) Viruta discontinua. Cuando se maquinan materiales relativamente frágiles (por ejemplo, hierro fundido) a bajas velocidades de corte, la viruta se forma frecuentemente en segmentos separados, ver figura 2.11 (a). Esto tiende a impartir una textura irregular a la superficie maquinada. Una alta fricción herramienta-viruta y los avances y profundidades grandes de corte promueven la formación de este tipo de viruta.

(b) Viruta continua. Cuando se cortan materiales de trabajo dúctiles a velocidades altas con avances y profundidades pequeñas se forman virutas largas y continuas, ver figura 2.11 (b). Cuando se forma este tipo de viruta se obtiene un buen acabado de la superficie. Un borde cortante bien afilado en la herramienta y una baja fricción herramienta-viruta propician la formación de virutas continuas.

(c) Viruta continua con acumulación en el borde. Cuando se maquinan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias, la fricción entre la herramienta y la viruta tiende a causar la adhesión de porciones de material de trabajo en la cara inclinada de la herramienta. Esta formación se llama acumulación en el borde, ver figura 2.11 (c). La

formación de esta acumulación es de naturaleza cíclica; se forma y crece, luego se vuelve inestable y se rompe. Gran parte de la acumulación de desecho se la lleva la viruta. Sin embargo, algunas porciones pueden incorporarse a la superficie de trabajo recién formada, ocasionando que la superficie se vuelva rugosa.

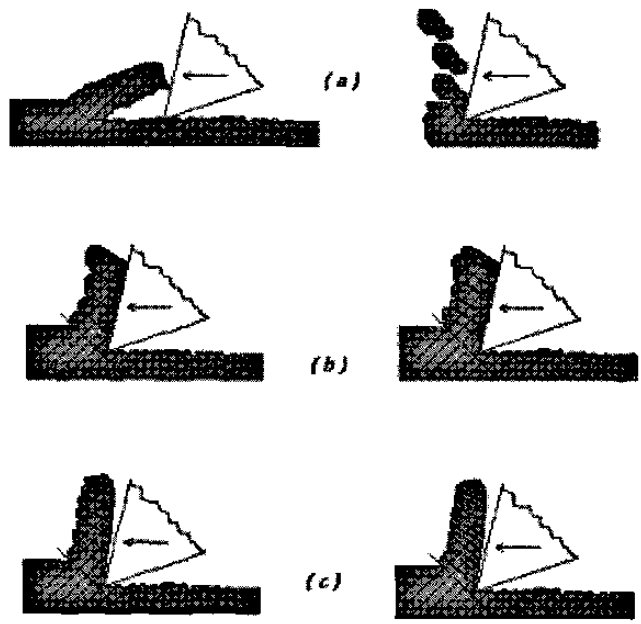

Figura 2.11 Tres tipos de formación de viruta en el corte de metales (a) discontinua, (b) continua y (c) continua con acumulación en el borde

2.4 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 Newtons. Las velocidades típicas de corte son de varios cientos de m/s 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:

$$P = F\,v \tag{2}$$

donde: P = potencia de corte, N-m/s;
F = fuerza de corte, N;
v = velocidad de corte, m/s.

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, 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%. [3]

2.4.1 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. [4, 5, 6, 7]

2.4.2 Métodos analíticos.

Hay varios métodos analíticos para estimar la temperatura de corte. Las referencias presentan algunas de estas aproximaciones. Este método 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.

$$T = 0.4\ (U/Qc)(vto/K)^{0.33} \qquad (3)$$

donde: T = aumento de la temperatura media en la interfase herramienta-viruta,
U = energía específica en la operación, N-m/mm^3;
v = velocidad de corte, mm/seg;
to = espesor de la viruta antes del corte, m;
Qc = calor específico volumétrico del material de trabajo;
K = difusividad térmica del material de trabajo, mm^2/seg.

2.4.3 Medición de la temperatura de corte.

Se han desarrollado métodos experimentales para la medición de temperaturas en maquinado. Las técnicas de medición más frecuentemente utilizadas 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[8] determinó la relación entre velocidad y temperatura y obtuvo la siguiente forma general:

$$T = Kv \tag{4}$$

donde: T = temperatura medida en la interfase herramienta-viruta y
v = velocidad de corte.

Los parámetros K dependen de las condiciones de corte (diferentes a v) y del material de trabajo. En la figura 2.12 se muestran las gráficas de la temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo, con ecuaciones similares a la ecuación 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.

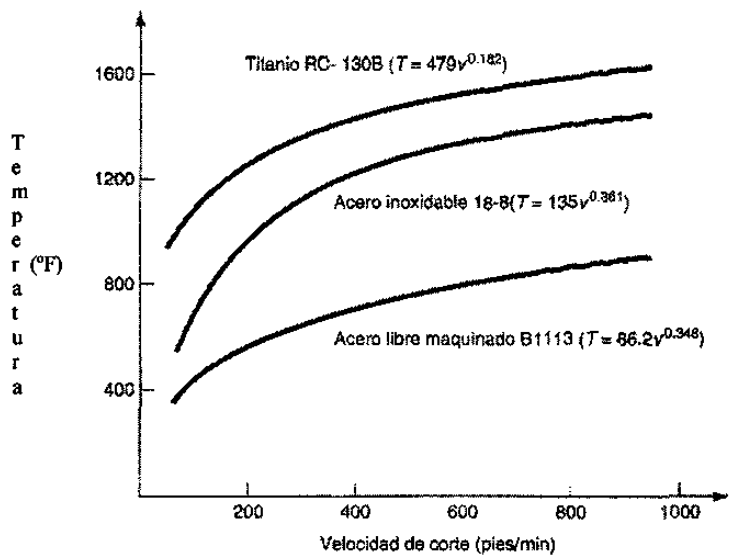

Figura 2.12 Temperatura contra velocidad de corte para varios materiales de trabajo

CAPÍTULO 3

TECNOLOGÍA DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE.

3.1 Vida de las herramientas.

Las operaciones de maquinado se realizan utilizando 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 existe una acción continúa de desgaste de la herramienta de corte que la conduce finalmente a la falla.

La tecnología de las herramientas de corte contiene 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 el 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.

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. Ver figura 3.1.

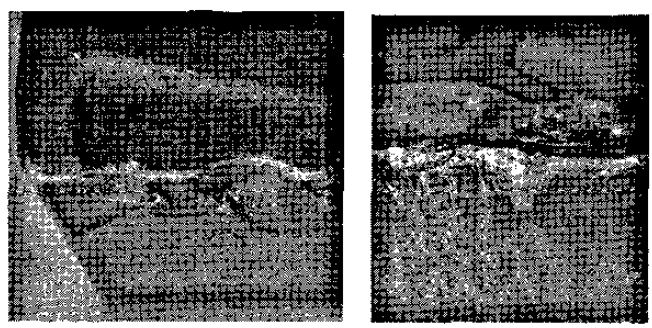

Figura 3.1 Falla por fractura en una herramienta de corte

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. Ver figura 3.2.

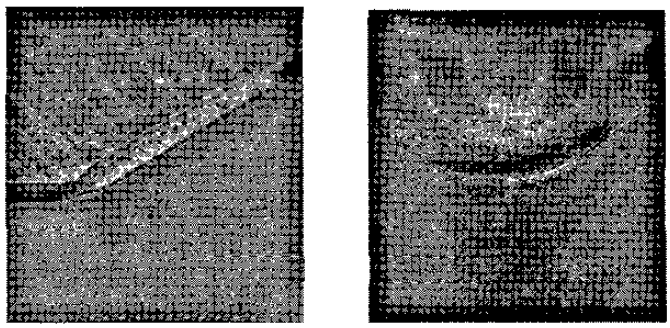

Figura 3.2 Falla por temperatura en una herramienta de corte

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. Ver figura 3.3.

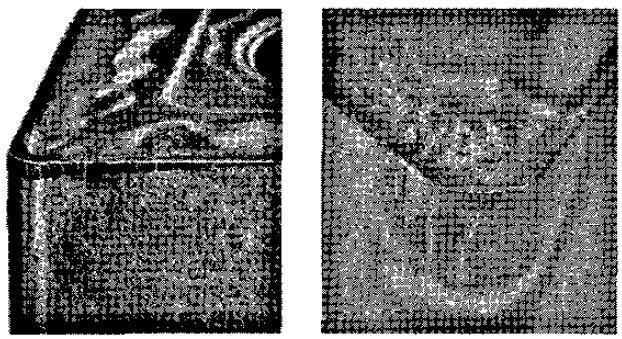

Figura 3.3 Falla por gradual de flanco (izquierdo) y de cráter (derecho) en una herramienta de corte

Las fallas por fractura y temperatura dan como resultado una pérdida prematura de la herramienta de corte. Estas dos formas de falla son por 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.

3.1.1 Desgaste de la herramienta.

El desgaste gradual ocurre en dos lugares principales de la herramienta de corte: en la parte superior de la superficie de ataque y en el flanco o superficie de incidencia. Por tanto, se pueden distinguir dos tipos principales de desgaste de la herramienta:

1) Desgaste en cráter y
2) Desgaste del flanco, ilustrado en la figura 3.4.

Se usará 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 banda de desgaste.

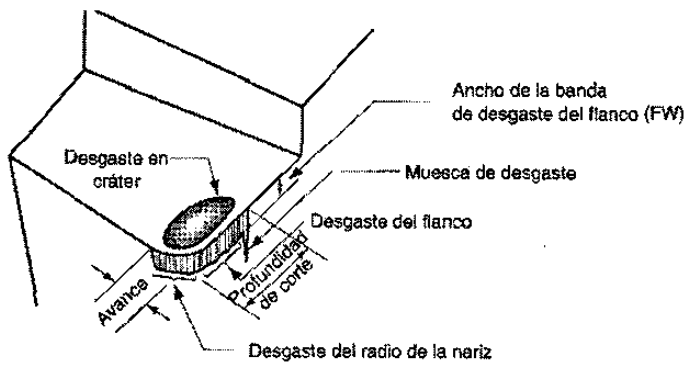

Figura 3.4 Desgaste de la herramienta

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. Esta 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, predominando en el desgaste del flanco. Es decir es el desgaste producido por el contacto entre materiales más duros que la herramienta y la propia herramienta rayándola y desgastándola.

Adhesión. Cuando dos metales entran en contacto a alta presión y temperatura, ocurre la adhesión o soldado entre ellos. Esta condición se encuentra 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. Es cuando en la zona de corte debido a las altas temperaturas, el material de corte y la herramienta se sueldan y, al separarse, parte de la herramienta se desprende.

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.

Fallas mecánicas. Fallas producidas por estrategias, condiciones de corte, herramientas, etc. inadecuadas.

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

El material de la herramienta debe cumplir con características específicas tales como:

- Ser suficientemente duro para resistir el desgaste y deformación pero tenaz para resistir los cortes intermitentes e inclusiones.
- Ser químicamente inerte en relación al material de la pieza de trabajo y estable para resistir la oxidación, para evitar que se genere el filo recrecido y desgaste prematuro.

Estas propiedades permitirán maquinar con altas velocidades de corte, aumentar la vida de las herramientas, permitir obtener la mejor calidad superficial y dimensional posible en la pieza a maquinar.

Pero, ¿Cómo se sabrá qué herramientas utilizar, qué papel juega cada una de sus propiedades? ¿Cómo se seleccionará la herramienta adecuada para cada material?. Y, para cada aplicación en concreto, ¿Cuáles son los factores que influyen tanto en la vida de la herramienta como en la calidad superficial de la pieza?: los recubrimientos, su geometría, el fluido refrigerante, el fluido de corte y la estrategia de maquinado, longitud de la herramienta, etc.

Para conocer un poco más a fondo estas características se realizará un estudio de las herramientas.

Para realizar el estudio de las herramientas se seleccionarán los tres campos clave en una herramienta: material de la herramienta, geometría y recubrimiento.

- Material de la herramienta.

Sustrato

Aceros para trabajos en frío o en caliente - No se utilizan en el MAV.

Acero rápido: una aleación de metales que contiene alrededor de un 20% de partículas duras. Apenas se utilizan en el MAV.

Carburo cementado o metal duro: hecho con partículas de carburo unidas por un aglomerante a través de un proceso de sinterizado. Los carburos son muy duros y representan de 60% a 95% del volumen total. Los más comunes son: Carburo de tungsteno (WC), carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC), carburo de niobio (NbC). El aglomerante típico es el cobalto (Co). Son muy adecuados para el maquinado de aluminio y silicio.

Carburo cementado recubierto: la base de carburo cementado es recubierta con carburo de titanio (TiC), nitruro de titanio (TiN), óxido de aluminio (Al_2O_3), nitruro de titanio carbono (TiCN), y nitruro de titanio y aluminio (TiAlN). La adhesión del recubrimiento será mediante deposición química por vapor (CDV), deposición física por

vapor (PVD) y deposición química por vapor a temperatura media (MTCVD). Buen equilibrio entre la tenacidad y la resistencia al desgaste.

Cermets (Ceramic / Metal): Aunque el nombre es aplicable incluso a las herramientas de carburo cementado, en este caso las partículas base son de TiC, TiCN, TiN en vez de carburo de tungsteno. El aglomerante es níquel-cobalto. Buena resistencia al desgaste y formación de cráteres, alta estabilidad química y dureza en caliente. Baja tendencia a la oxidación y a la formación del filo recrecido. Son de gran dureza y resistencia a la abrasión en detrimento de su tenacidad. Los cermets se aplican mejor a aquellos materiales que producen una viruta dúctil, aceros y las fundiciones dúctiles. Los modernos aleados TaNbCy MoC añadidos incrementan la resistencia de los cermets ante el choque cíclico propio de la operación de fresado.

Cerámicos: Existen dos tipos básicos de cerámica: Las basadas en óxido de aluminio (Al_2O_3) y las de nitruro de silicio (Si_3N_4). Son duras con alta dureza en caliente, y no reaccionan químicamente con los materiales de la pieza. Sin embargo son muy frágiles. Ideales para el maquinado de piezas en duro y como reemplazo de las operaciones de rectificado.

Nitruro de Boro Cúbico (CBN): Es uno de los materiales más duros. Ocupa el segundo lugar después del diamante. Dureza extrema en caliente, excelente resistencia al desgaste y en general buena estabilidad química durante el maquinado. Es frágil, pero más tenaz que las cerámicas.

Diamante policristalino (PCD): Es casi tan duro como el diamante natural. Este diamante sintético tiene una increíble resistencia al desgaste y una baja conductividad térmica. Sin embargo, son muy frágiles. La vida de la herramienta es hasta cien veces mayor que la del carburo cementado. Desventajas: las temperaturas de corte no deben exceder 600 °C, no puede ser usado para cortar materiales ferrosos porque existe afinidad, y no sirve para cortar materiales tenaces.

- Geometría.

Espiga (cuello) cónica: Con el fin de mejorar la rigidez.

Alma de gran diámetro: Mayor estabilidad a la herramienta, reduce las vibraciones y el riesgo de mellado de los filos. Menor flexión y una mejor tolerancia de la pieza maquinada.

Cuello de la herramienta rebajado: Mayor alcance en cajeras profundas. Evita el contacto y los roces. Reduce las vibraciones.

Mango cilíndrico largo: Para una mejor sujeción y equilibrio.

Ángulo de desprendimiento negativo (-15°): Mayor estabilidad y resistencia del filo. Menor tiempo de contacto con la viruta. El calor se transmite a la viruta. Mínima tolerancia de radio. Mejor acabado superficial. Menor necesidad de pulido. Producto final más próximo a la forma definitiva.

Canales de evacuación de viruta según el tipo de material a maquinar.

Aleaciones ligeras: *Arista muy viva para permitir un corte suave evitando* la adherencia de material al filo. Herramientas de pocos labios (2) con ángulos de hélice de 25° a 30° y paso largo para facilitar la evacuación de grandes caudales de viruta.

Materiales duros: Pasos y longitudes de corte cortos, mayor rigidez. Mucha hélice para disminuir la resistencia al corte y mejorar el acabado. Herramientas de muchos labios (4-8): Breve contacto con la viruta, menor absorción de calor, viruta corta.

Herramientas enterizas y de insertos:

Enterizas: Mayor precisión, rigidez y equilibrio. Mejor calidad de pieza. Disposición de herramientas de cualquier diámetro. Elevado costo. Distintos tipos de material. Dificultad a la hora del afilado: necesidad de una estrecha relación proveedor-usuario.

De insertos: Menos rígida: Menor precisión superficial y dimensional. Diámetros cercanos a los 8 mm. Solo metal duro para MAV. Normalmente para desbaste, necesita mucha potencia. Menor costo. Facilidad de reposición.

- Recubrimientos.

Las características principales de los recubrimientos se resumen en los siguientes puntos:

- Aumentan la dureza en los filos de corte de la herramienta.
- Facilitan la disipación del calor acumulado en el filo de corte.
- Baja conductividad térmica que favorece la eliminación del calor a través de la viruta.
- Aumentan la resistencia a la abrasión, disminuyen la afinidad herramienta-pieza.
- El grosor del recubrimiento varía entre 0.0001" y 0.0005".
- Los recubrimientos se aplican mediante deposición química de vapor o deposición física de vapor.

Recubrimientos de TiAlN

Son los que más se utilizan actualmente, y poco a poco van dejando atrás a los demás. Los recubrimientos TiAlN multicapa están remplazando los de TiCN, y los monocapa a los de TiN.

TiAlN (multicapa y monocapa) son recubrimientos extraduros (PVD) basados en nitruro de titanio aluminio que destacan por su dureza, estabilidad térmica y resistencia a ataques químicos. Protegen las aristas de corte por abrasión y adhesión así como por carga térmica.

- Multicapa: combina la elevada tenacidad de la estructura multicapa, con su alta dureza y la buena estabilidad térmica, 800°C, y química de la capa TiAlN. Así protege las herramientas de corte de acero rápido y metal duro contra el desgaste prematuro producido por tensiones severas. Debido a su estabilidad térmica, permite trabajar en maquinados a altas velocidades e incluso en seco o con mínima cantidad de lubricante.

- Monocapa: desarrollado para su aplicación en fresas de metal duro utilizadas en condiciones de maquinado severas. Su elevada dureza, y notable estabilidad térmica, 800°C, y química hacen que sea óptimo para las fresas que se utilizan en el maquinado de materiales térmicamente tratados empleados, como por ejemplo, en moldes, punzones, matrices y utillajes de forja.

Recubrimiento de diamante

Se utiliza en herramientas para maquinar materiales muy abrasivos como el grafito. Durante el maquinado de estos materiales las herramientas se desgastan rápidamente y la calidad de las superficies maquinadas y la precisión dimensional son pobres. Con las herramientas recubiertas de diamante, un recubrimiento cuya dureza es superior a los 8000 Vickers, además de obtener una vida útil más larga y poder aumentar las velocidades de corte, disminuyendo así de manera importante el tiempo de maquinado, se consigue un buen acabado de la superficie y una buena precisión dimensional.

Recubrimiento WC/C

Realizado por deposición física al vapor a temperaturas alrededor de los 200°C. Al realizarse el proceso de recubrimiento en alto vacío, las propiedades del recubrimiento son sustancialmente mejores que las logradas a presión atmosférica (proyección térmica), o en gases y baños (nitruración, galvanizado). Los recubrimientos tienen un espesor de capa de solo unas micras y son la última operación dentro de los componentes de precisión. Este recubrimiento presenta una combinación única de características: Bajo coeficiente de fricción, alta resistencia al desgaste, una excelente capacidad de carga.

Recubrimientos de TiAlN monocapa combinado con WC/C

Este recubrimiento hace frente a todos aquellos mecanismos de desgaste que se dan en la formación y evacuación de viruta. Combina la alta dureza y estabilidad térmica del

recubrimiento TiAlN con las buenas propiedades de deslizamiento y lubricación del recubrimiento WC/C. Se utiliza sobre todo en taladrados y roscados.

3.1.2 Vida de las herramientas.

Al continuar el corte, los diferentes mecanismos de desgaste producen mayores niveles del mismo en la herramienta de corte. La relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte se muestra en la figura 3.5. 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 éste período le sigue un desgaste a una velocidad más o menos uniforme y se le llama la región de desgaste de estado estable. En la figura ésta región se representa como una función lineal del tiempo, aunque en el maquinado real también hay desviaciones de la línea recta.

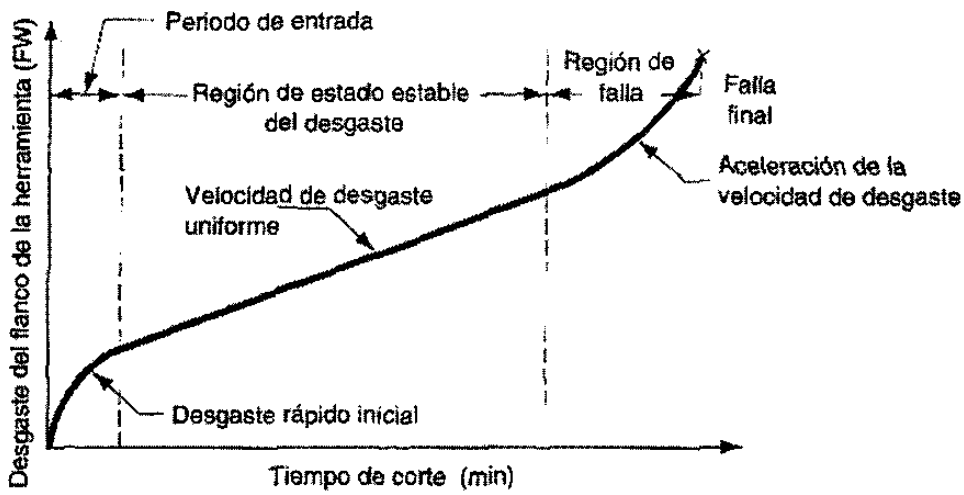

Figura 3.5 Relación general de desgaste de la herramienta contra el tiempo de corte

Finalmente, el desgaste alcanza un nivel donde la velocidad del mismo 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 se muestra en la figura 3.6. Al aumentar las velocidades de corte se incrementa la velocidad de desgaste, alcanzándose el mismo nivel de desgaste en menos tiempo.

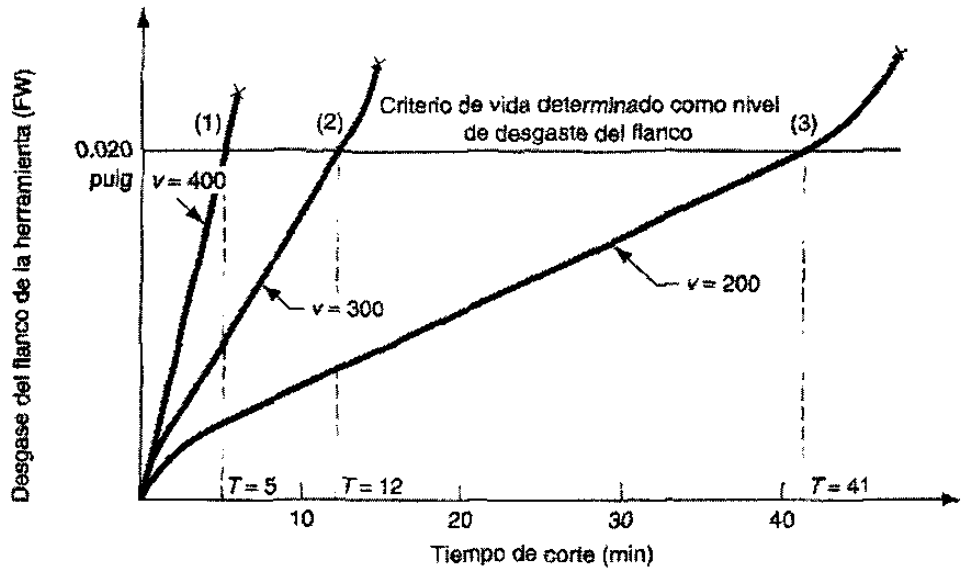

Figura 3.6 Curvas de desgaste de la herramienta para varias velocidades de corte

La vida de la herramienta se define como la longitud de tiempo de corte en el cual se puede utilizar la herramienta. Una forma de definirla consiste en permitir su operación hasta que ocurra una falla catastrófica. Esto se indica en la figura 3.6 por el final de cada curva de desgaste. Sin embargo, en producción frecuentemente es inconveniente usar una herramienta hasta que ocurra una 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 que en la gráfica de la figura 3.7 se ilustra como una línea horizontal. Cuando cada una de las tres curvas de desgaste intersectan 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. Las velocidades de corte más altas traen como consecuencia vidas más cortas para la herramienta.

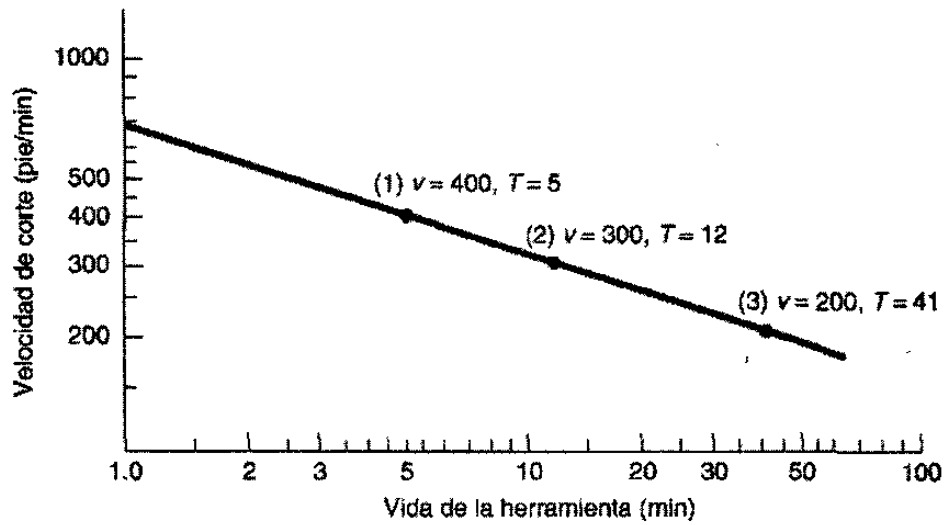

Figura 3.7 Vida de la herramienta

Criterios para la vida de la herramienta en producción:

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 de 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.

3.2 Materiales para herramientas.

Las herramientas de corte deben poseer ciertas características específicas. 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: [4, 9, 10, 11]

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.
   Esta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta. (porque en un proceso de maquinado con herramientas tradicionales temperatura; herramienta > temperatura pieza > temperatura viruta; con herramientas más avanzadas se logra concentrar el aumento de temperatura en la viruta).

3) Resistencia al desgaste. La dureza es la propiedad más importante que se necesita para resistir el desgaste abrasivo. Todos 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.

La selección de la herramienta de corte va a depender de la operación de corte a realizar, el material de la pieza, las propiedades de la máquina, la terminación superficial que se desee, etc.

Para cumplir con cada uno de estos requerimientos han surgido herramientas formadas por diferentes aleaciones. Los materiales para las herramientas de corte incluyen aceros al carbono, aceros de mediana aleación, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos cementados, cerámicas u óxidos y diamantes.

Para conocer las aleaciones de aceros para herramientas hay que comprender las funciones que cumplen cada uno de los elementos que forman la aleación. El resumen de estas características se presenta la tabla 2. Los elementos se agregan para obtener una mayor dureza y resistencia al desgaste, mayor tenacidad al impacto, mayor dureza en caliente en el acero, y una reducción en la distorsión y pandeo durante el templado. Aquí se presenta un recuadro con los elementos químicos utilizados para colaborar con las propiedades mencionadas. En la tabla 2 se puede observar los elementos químicos utilizados que incrementan las propiedades mecánicas.

Elemento	Cantidad	Propiedades
Carbono, *C*	0,6 % - 1,4 %	- Forma carburos con el hierro. - Aumenta la dureza. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste.
Cromo, *Cr*	0,25 % - 4,5 %	- Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la tenacidad.
Cobalto, *Co*	5 % - 12 %	- Se emplea en aceros de alta velocidad. - Aumenta la dureza en caliente. - Permite velocidades y temperaturas de operación más altas manteniendo la dureza y los filos.
Molibdeno, *Mo*	hasta 10 %	- Elemento fuerte para formar carburos. - Aumenta la resistencia mecánica. - Aumenta la resistencia al desgaste. - Aumenta la dureza en caliente. - Siempre se utiliza junto a otros elementos de aleación
Tungsteno, *W*	1,25 % - 20 %	- Mejora la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia mecánica.
Vanadio, *V*	Aceros al Carbono 0,20 % - 0,5 % Aceros Alta Veloc. 1 % - 5 %	- Aumenta la dureza en caliente. - Aumenta la resistencia a la abrasión.

Tabla 2. Elementos de cada aleación con sus propiedades

En las herramientas de corte existen varias familias dependiendo del material que se componen, cada una tiene ciertas características de resistencia y puede realizar mejor alguna operación de corte. Algunos ejemplos son los siguientes materiales de herramientas de corte: 1) aceros al carbono y de baja aleación, 2) aceros de alta velocidad, 3) fundición de aleaciones de cobalto, 4) carburos cementados, cermets y carburos recubiertos, 5) cerámicos, 6) diamantes sintéticos y nitruro de boro cúbico. Ver tabla 3. La resistencia a la ruptura transversal es una propiedad que se usa para indicar la tenacidad de los materiales duros.

Herramienta	Características	Utilización
Aceros al Carbono y de baja aleación	Son el tipo de acero más antiguo en herramientas de corte. Son muy baratos. Tienen buena resistencia al impacto. Se pueden someter fácilmente a tratamientos térmicos como el templado, lográndose un amplio rango de durezas. Se forman y rectifican con facilidad. Mantienen su borde filoso cuando no están sometidos a abrasión intensa o a altas temperaturas. Han sido sustituidos por otros materiales.	□ Brocas que trabajan a velocidades relativamente bajas. □ Machuelos. □ Escariadores y brochas.
Aceros de Alta Velocidad	Son el grupo con mayor contenido de aleaciones de los aceros. Conservan la dureza, resistencia mecánica y filo de los aceros. Empleando los equipos adecuados pueden ser templadas por completo con poco riesgo de distorsión o agrietamiento. Se templan en aceite.	□ Taladrar. □ Escariar. □ Fresar. □ Brochar. □ Machuelar. □ Máquinas para fabricar tornillos.
Aleaciones de Fundición de cobalto	Mantienen su elevada dureza a altas temperaturas. Tienen buena resistencia al desgaste. No se necesitan fluidos de corte.	□ Se recomiendan para operaciones de desbaste profundo con velocidades y avances relativamente altos □ Sólo se emplean para obtener un acabado superficial especial.
Carburos Cementados, cerments	Tienen carburos metálicos. Se fabrican con técnicas de metalurgia de polvos. Tienen alta dureza en un amplio rango de temperaturas. Elevado módulo elástico, dos o tres veces el del acero. No representan flujo plástico. Baja expansión térmica. Alta conductividad térmica. Se emplean como insertos o puntas que se sueldan o sujetan a un vástago de acero. Se encuentran en diferentes formas, circulares, triangulares, cuadrados y etc.	
Carburo de Tungsteno Aglutinado con Cobalto Carburo de Tungsteno Aglutinado con Cobalto Solución Sólida de WC-TiC-TaC-NbC Carburo de Titanio con Aglutinante de Níquel y Molibdeno	W: Tungsteno C: Carbono Ti: Titanio Ta: Tantalio Nb: Niobio Opera a altas temperaturas debido a las altas velocidades de corte. Trabaja piezas de materiales con alta resistencia mecánica.	□Se emplean para maquinar hierros fundidos y metales abrasivos no ferrosos. Maquinar aceros. Cortar.
Carburos recubiertos	Son insertos normales de carburo revestidos con una capa delgada de carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio. Con el revestimiento se obtiene una resistencia superior al desgaste, a la vez que se mantiene la resistencia mecánica y la tenacidad. No se necesitan fluidos de corte, si se aplica debe ser en forma continua y en grandes cantidades, para evitar calentamiento y templado. Los avances suaves, las bajas velocidades y el traqueteo son dañinos.	□ Se utilizan en máquinas de herramientas rígidas, de mayor velocidad y más potentes.
Cerámicas u Óxidos	Se constituyen de granos finos de aluminio ligados entre sí. Con adiciones de otros elementos se logran propiedades óptimas. Resistencia muy alta a la abrasión. Son más duras que los carburos cementados. Tienen menor o nula tendencia a soldarse con los metales durante el corte. Carecen de resistencia al impacto. Puede ocurrir una falla prematura por desportilladura o rotura.	□ Son eficaces para operaciones de torneado ininterrumpido a alta velocidad.
CBN Nitruro Cúbico de Boro Cúbico	Es el material más duro que existe en la actualidad. Se liga a un sustrato de carburo. La capa de CBN produce una gran resistencia al desgaste. Gran resistencia mecánica de los bordes. Es químicamente inerte al hierro y al níquel a altas temperaturas.	□ Es adecuado para trabajar aleaciones de altas temperaturas y diversas aleaciones ferrosas. □ Se emplea como abrasivo en operaciones de rectificado.

Tabla 3. Las herramientas y su utilización

A los carburos cementados se le asigna Grado C-1, Grado C-2, etc. Los grados 1 a 4 se recomiendan para maquinar hierro fundido, materiales no ferrosos y no metálicos; los grados 5 a 8 son para maquinar aceros y sus aleaciones. Los grados 1 y 5 son para desbastar, los 2 y 6 son para uso general, 3 y 7 son para acabado, y 4 y 8 son para acabado de precisión. Existen también otros grados para diversas aplicaciones y según lo riguroso de la operación de maquinado.[14]

Los materiales duros se han utilizado para cortar o deformar otros metales durante miles de años. Sin embargo, en los últimos 150 años se han inventado o desarrollado mejores materiales. Por lo general, a medida que se dispuso de mejores materiales, se construyeron máquinas-herramientas más grandes y potentes para producir piezas maquinadas con mayor rapidez y economía.

3.3 Geometría de las herramientas.

Las herramientas se pueden clasificar de diferentes maneras, las más comunes responden al número de filos, el material del que están fabricadas, al tipo de movimiento que efectúa la herramienta, al tipo de viruta generada o al tipo de máquina en la que se utiliza. La tabla 4 presenta algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación.

Tabla 4. Algunas herramientas y como se agrupan para su clasificación

DE ACUERDO AL NÚMERO DE FILOS	a. De un filo, como los buriles de corte de los tornos o cepillos. b. De doble filo en hélice, como las brocas utilizadas para los taladros. c. De filos múltiples, como las fresas o las seguetas
DE ACUERDO AL TIPO DE MATERIAL CON QUE ESTÁN FABRICADAS	WS. Acero de herramientas no aleado. 0.5 a 1.5% de contenido de carbón. Soportan sin deformación o pérdida de filo 250°C. También se les conoce como acero al carbono. SS. Aceros de herramienta aleados con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros. Soporta hasta 600°C. También se les conoce como aceros rápidos. HS. Metales duros aleados con cobalto, carburo de carbono, tungsteno, wolframio y molibdeno. Son pequeñas plaquitas que se unen a metales corrientes para que los soporten. Soportan hasta 900°C. Diamante. Material natural que soporta hasta 1800°C. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo. Materiales cerámicos. Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C. Por lo regular se utilizan para terminados.
POR EL TIPO DE MOVIMIENTO DE CORTE	1. Fijo. La herramienta se encuentra fija mientras el material a trabajar se incrusta debido a su movimiento. Por ejemplo los tornos, en los que la pieza gira y la herramienta está relativamente fija desprendiendo viruta. 2. Contra el material. La herramienta se mueve en contra del material, mientras este se encuentra relativamente fijo, como en los cepillos. 3. En contra dirección. La herramienta y el material se mueven un en contra una del otro, como en el esmerilado sobre torno.
POR EL TIPO DE VIRUTA QUE GENERA	1. Polvo sin forma definida o viruta discontinua. 2. Viruta continua, en forma de espiral. 3. Viruta continua con borde acumulado.
POR EL TIPO DE MÁQUINA EN LA QUE SE UTILIZA	1. Torno 2. Taladro 3. Fresa 4. Cepillo 5. Broca

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 tronzado, fresas, brocas, escariadores, y muchas otras herramientas de corte, cuyo nombre deriva de la operación en que se usa cada una con su geometría propia y única.

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. 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.

3.3.1 Corte.

El siguiente movimiento del uso de una herramienta de un solo punto es el uso de una herramienta de puntos múltiples. Inicialmente esta es una operación en línea recta; los primeros "aserraderos" no eran sierras circulares grandes, como es común ahora, sino que eran grandes sierras oscilantes rectas, impulsadas por un mecanismo hidráulico; estas máquinas aún existen, ya que tiene la capacidad de cortar material muy grueso, cuando una sierra circular necesitaría ser de un diámetro tan grande que sería prohibitiva. El principio todavía se encuentra en la sierra caladora que se utiliza en la industria de la transformación de la madera, así como la limadora y el arco de segueta de ingeniería. Una variante es la mandrinadora (figura 3.8), donde una herramienta de dientes múltiples es jalada o empujada por el material para obtener un orificio (taladro) de forma especial que seria muy difícil obtener por cualquier otro medio (figura 3.9).

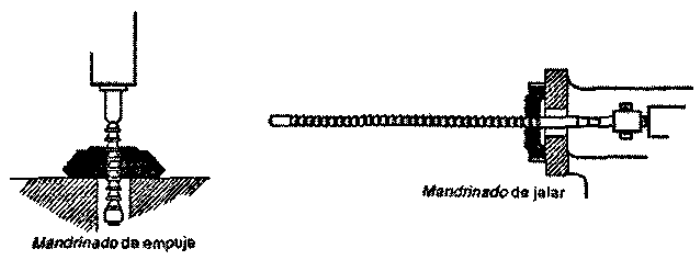

Figura 3.8 Operaciones de mandrinado

Figura 3.9 Partes típicas hechas por mandrinado

Todas estas máquinas emplean movimiento oscilatorio, y como la herramienta corta sólo en una dirección, el movimiento de regreso no tiene eficiencia y el proceso es relativamente poco satisfactorio. Por esta razón se idearon las hojas flexibles, que permiten que los bordes cortantes sigan una trayectoria recta, luego se curvan despegándose de la pieza de trabajo para retornar al punto inicial, lo cual permiten corte continuo. La sierra cinta (figura 3.10) se puede encontrar, en forma horizontal y vertical, en prácticamente toda industria manufacturera con hojas para adaptarse a todos los materiales.

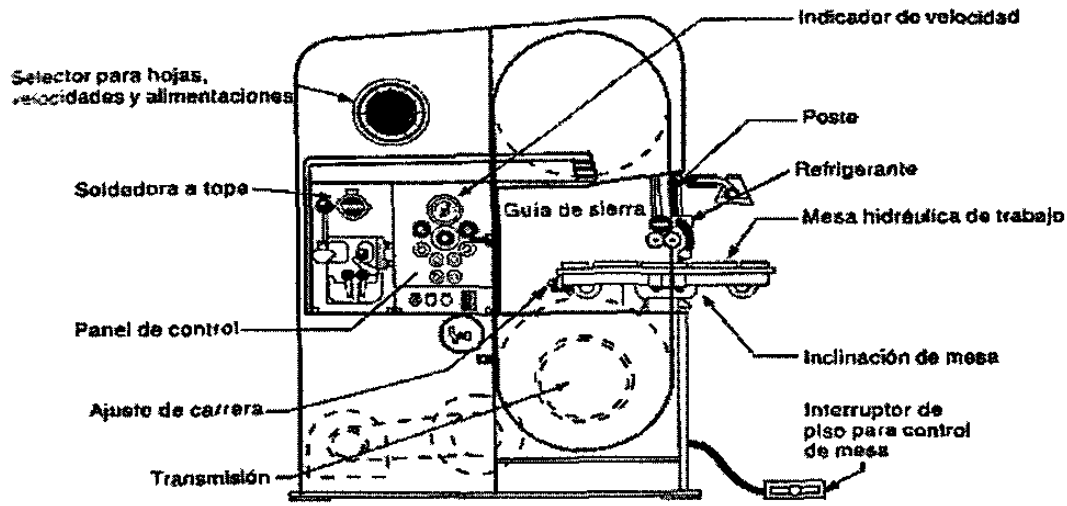

Figura 3.10 Sierra cinta típica

El siguiente avance en corte fue poner los dientes de corte alrededor de la periferia de un eje o disco giratorios, y es así que la mayor parte del maquinado se lleva a cabo. La sierra circular es la forma más elemental y se ilustra en las figuras 3.11 y 3.12, en tanto que la figura 3.13 muestra otra aplicación de una sierra, esta vez para cortar agujeros redondos de madera o metal laminado.

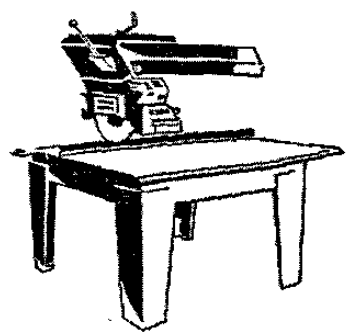

Figura 3.11 Sierra de brazo superior

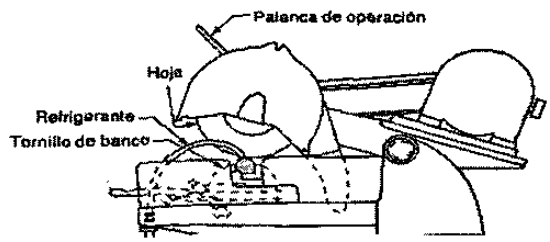

Figura 3.12 Sierra de corte

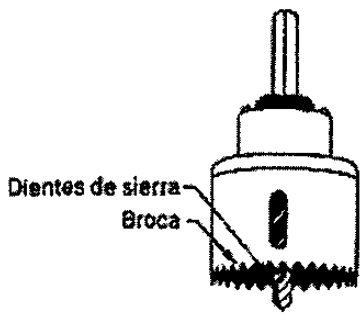

Figura 3.13 Cortador Sierra

Es conveniente considerar el diente cortador en sí. Al igual que la herramienta de un torno, debe tener holgura para las virutas o rebaba producida y ángulo de ataque frontal para obtener una cara cortante. También debe haber algún lugar a donde vaya la viruta, para evitar que se trabe la herramienta en la pieza de trabajo, y por esta razón los dientes de la sierra no estén en línea, sino que son más angostos que el corte que se producirá, y están en "zigzag" para obtener la holgura necesaria; esto se conoce como "triscado". La terminología para dientes de sierra, y formas de obtener el triscado, se muestra en la figura 3.14. La forma del diente de sierra varia de acuerdo con la naturaleza del material por cortar: el corte de tela o de pan necesita un cortador que sea en esencia, una hoja de cuchillo de borde ondulado, a veces sin dientes como tales, en tanto que el acero exige un diente duro y pequeño y la madera un diente más grande con un triscado mas pronunciado. Los materiales muy duros se pueden moler, lo que es todavía una acción de corte. Cada partícula de la rueda de abrasiva forma un punto de corte pequeño, pero muy duro, que cuando pierde filo tiene la ventaja de desprenderse para dejar expuesto un nuevo punto de corte. Así, las máquinas similares en general, pero que utilizan diferentes hojas de corte, se encuentran en toda industria.

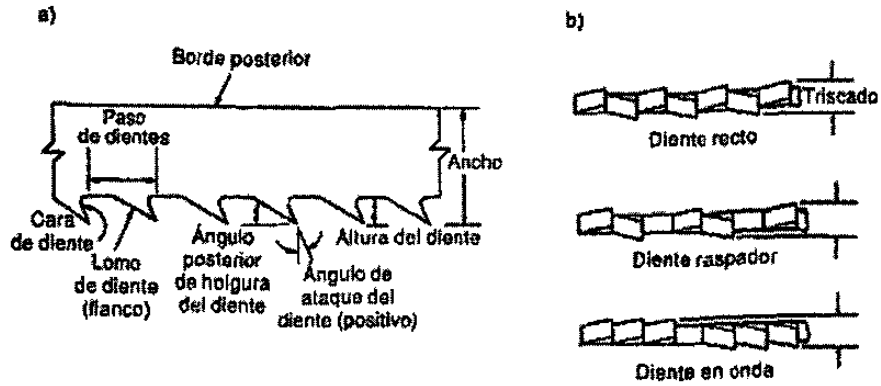

Figura 3.14 a) Terminología para dientes de sierra, b) tipos de dientes de sierra, en "zig zag" para dar holgura y evitar dobladuras

El término "sierra" se reserva generalmente para cortadores angostos para cortar o rebanar materiales, es tanto que otras versiones más anchas se llaman cortadores; éstos se pueden diseñar para cortar a lo largo de su periferia, o a lo largo de su cara, o de ambos. Las caras cortantes pueden ser lineales o con formas especiales; pueden estar sujetas por un zanco o caña como en el caso de una broca, o pueden estar montadas en un husillo o mandarín. Sus caras cortantes pueden ser rectas, inclinadas o en espiral para ayudar a la eliminación de la viruta. En la figura 3.15 se muestran varias herramientas cortadoras.

Las máquinas que utilizan estas herramientas corresponden a dos categorías, según el alineamiento de sus husillos de corte.

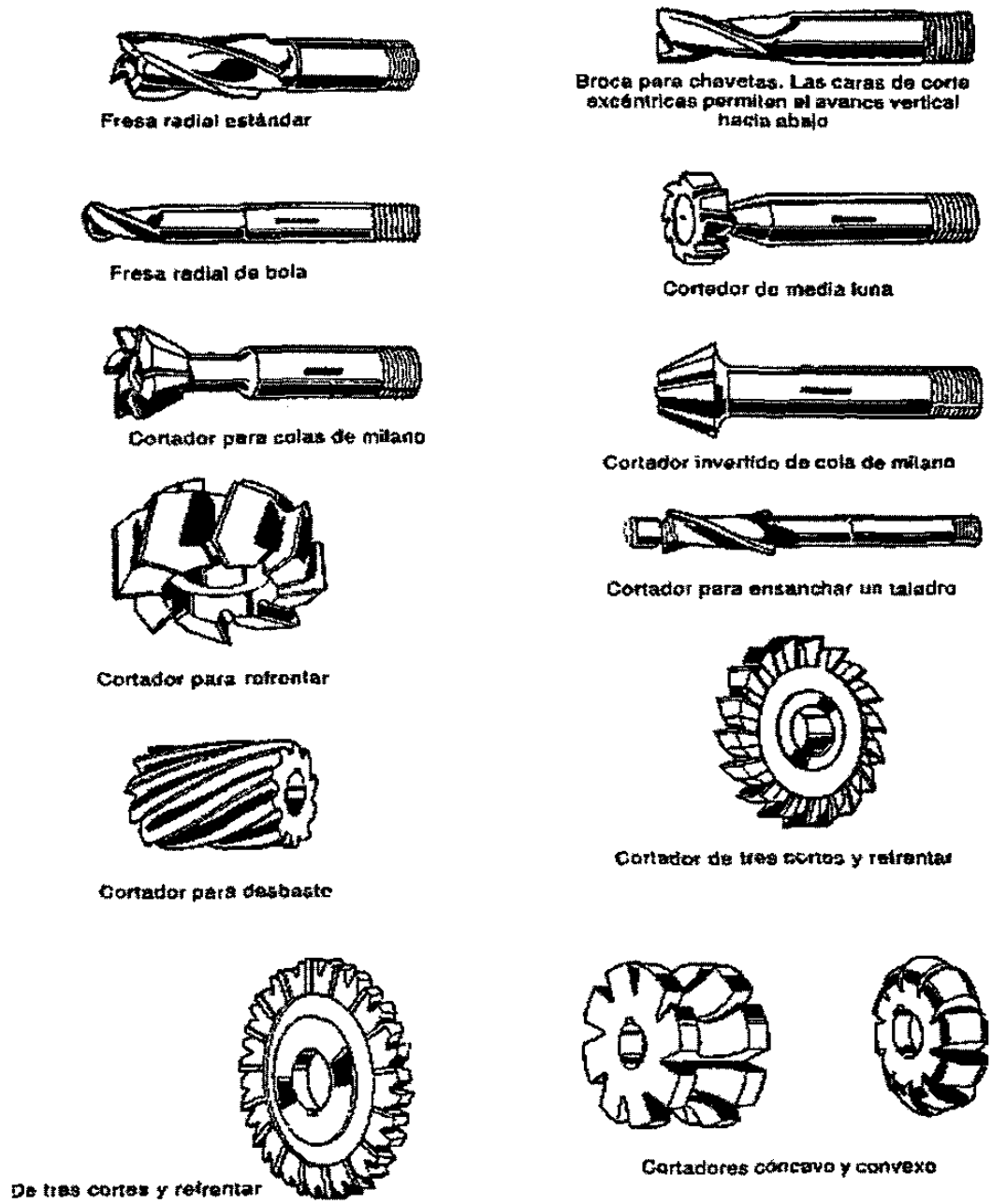

Figura 3.15 Cortadores de fresadora

El proceso de Fresado consiste en arrancar material de una pieza haciéndola pasar por una herramienta multifilo (varios dientes). A diferencia del maquinado en un torno, en la fresa se mueve la pieza a maquinar (en el torno la herramienta) y la herramienta permanece fija rotando.

Toda herramienta para fresado queda definida por tres parámetros, según la nomenclatura A * B * C, donde A es el diámetro, B es el ancho y C es el número de dientes.

En la figura 3.16 se muestran algunas herramientas para el maquinado en una fresa:

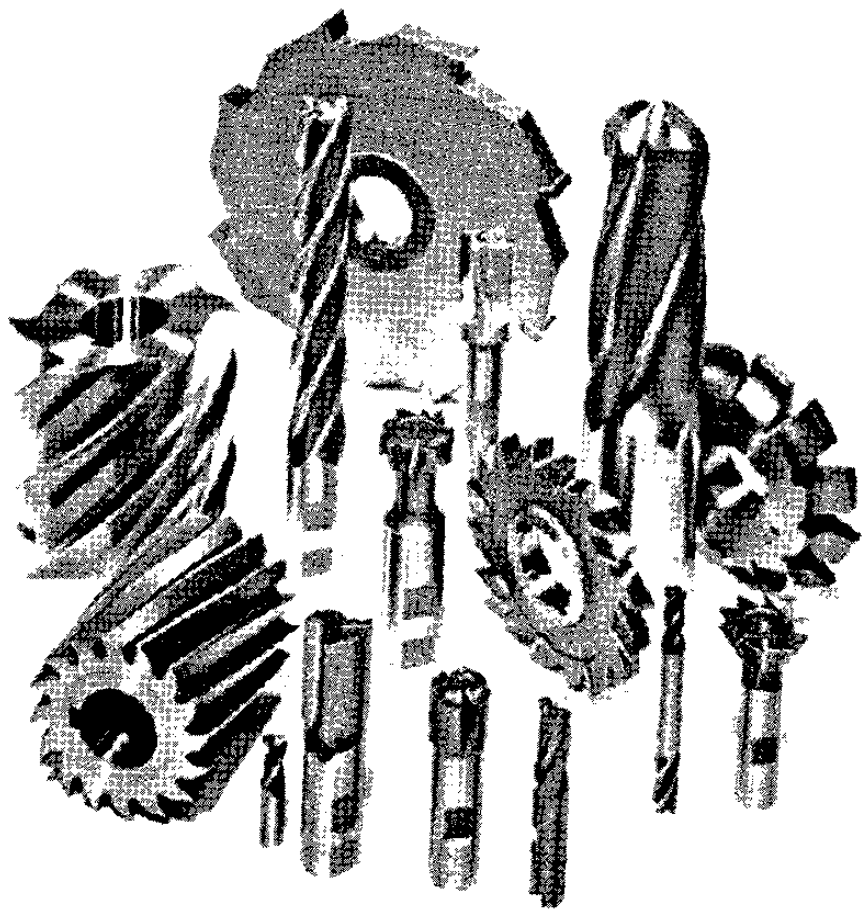

Figura 3.16 Herramientas de fresado

El fresado se puede clasificar según la posición de la herramienta respecto del material de trabajo en:

a.- Fresado horizontal: la superficie fresada es generada por los dientes localizados en la periferia del cuerpo cortante (herramienta). El eje de rotación de la herramienta está en un plano paralelo al de la superficie de la pieza de trabajo.

b.- Fresado vertical: la herramienta es montada en un husillo, cuyo eje es perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. Aquí la herramienta corta solo con una parte de sus dientes.

c.- Fresado superficial: es confundible con el fresado vertical, pero se diferencia en que la superficie de la herramienta en contacto con el material no es plana (fresado vertical), sino que tiene filo con formas diversas.

Todos estos procesos se muestran en la figura 3.17

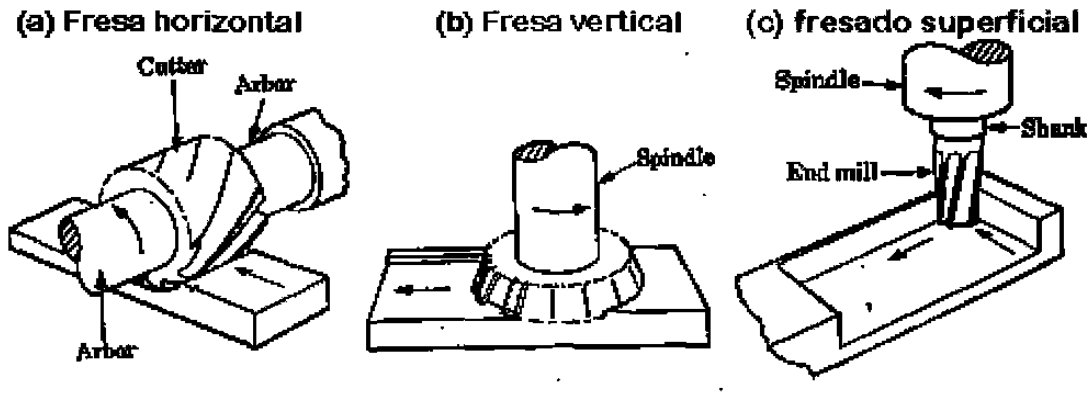

Figura 3.17 Clasificación del fresado según la posición de la herramienta

Fresado Horizontal

Este proceso será en el que más profundizaremos en fresado, considerando que los otros tipos de fresado se analizan en forma análoga. Así, los resultados obtenidos en el fresado horizontal serán ilustrativos del fresado vertical y superficial.

Todo proceso de fresado puede clasificarse según el sentido de rotación de la herramienta respecto del avance de la pieza a maquinar (figuras 3.18 y 3.19).

Rotación a favor del avance

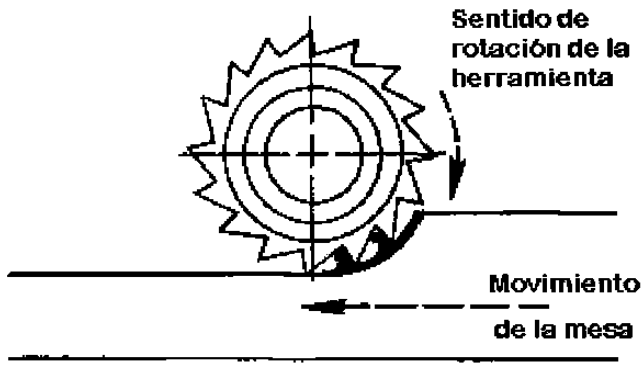

Figura 3.18 Fresado con rotación a favor del avance

Rotación en contra del avance

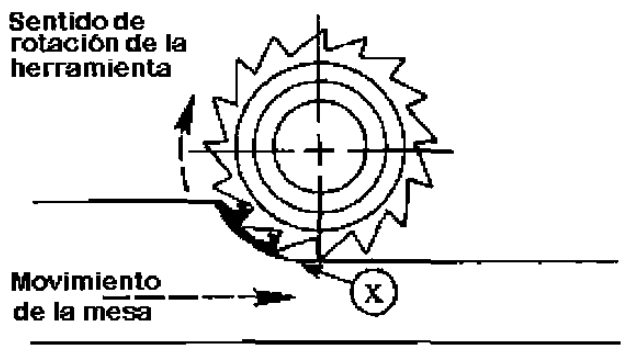

Figura 3.19 Fresado con rotación en contra del avance

En el caso de rotación a favor del avance se obtiene una mejor calidad superficial, pero la herramienta suele montarse sobre la pieza, con lo que se rompe. Además, se requiere menor potencia y existe mayor rigidez. En la rotación en contra se obtiene una superficie de menor calidad, pero la herramienta asegura una mayor duración.

El sentido de rotación dependerá de las características del material a maquinar. En el caso de un material blando, a favor del avance, y si es un material duro, en contra del avance. En la práctica se usa principalmente el sentido de rotación en contra del avance.

Algunas operaciones de fresado horizontal se muestran a continuación en la figura 3.20

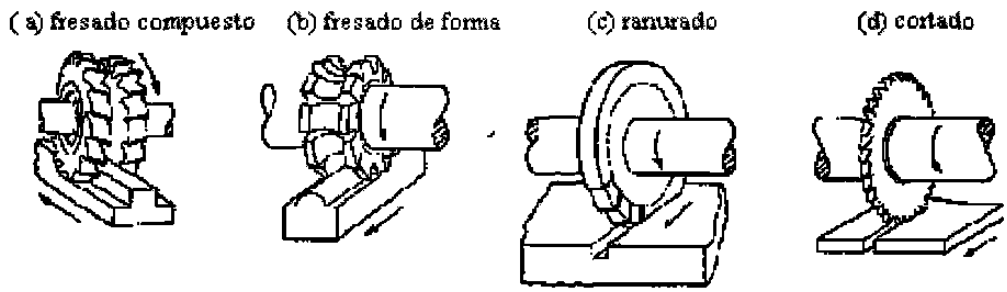

Figura 3.20 Operaciones del fresado horizontal

Para el fresado horizontal, el avance está dado por:

$$f = \frac{V_f}{n_w} \tag{5}$$

, donde V_f es la velocidad de avance de la pieza.

El encaje de avance se define como el avance por diente de la fresa:

$$a_f = \frac{f}{N} \tag{6}$$

, con N igual al número de dientes de la herramienta.

Para el fresado horizontal tenemos la situación que se ve en la siguiente figura 3.21.

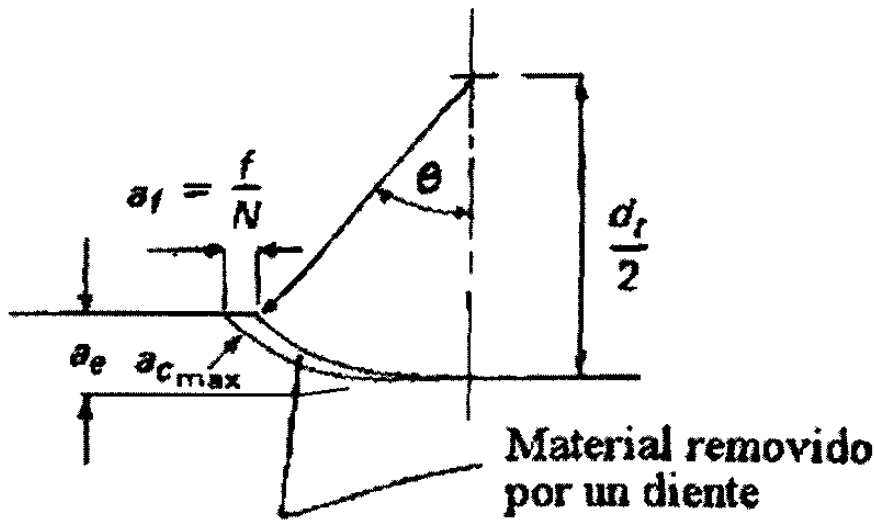

Figura 3.21 Fresado horizontal

El espesor máximo de viruta no deformada está dado por:

$$a_{cmax} = \frac{V_f * \text{sen}(\theta)}{N * n_w} = \frac{f}{N} * \text{sen}(\theta) \qquad (7)$$

$$, \text{y} \quad a_{cav} = \frac{a_{cmax}}{2} \qquad (8)$$

De la figura 3.21,

$$\cos(\theta) = 1 - \frac{2 * a_e}{d_t} \qquad (9)$$

, donde a_e es el encaje axial y d_t el diámetro exterior de la fresa.

Entonces,

$$\text{sen}\left(\theta\right) = 2 * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} - \left(\frac{a_e}{d_t}\right)^2} \tag{10}$$

Y reemplazando (10) en (7),

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} - \left(\frac{a_e}{d_t}\right)^2} \tag{11}$$

Reordenando (11),

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t} * \left(1 - \frac{a_e}{d_t}\right)}$$

Y, si $a_e \langle\langle d_t$,

$$a_{cmax} = \frac{2 * V_f}{N * n_w} * \sqrt{\frac{a_e}{d_t}} \tag{12}$$

El tiempo de maquinado está dado por:

$$t_m = \frac{L_w + L_o + L_1}{V_f} \tag{13}$$

, donde

$$L_o = \sqrt{a_e * \left(d_t - a_e\right)}$$

$$\text{y } L_1 \geq \frac{d_t}{2}$$

, esta última es la distancia que debe ser retirada la herramienta para poder sacar la pieza.

Estas dos dimensiones representan el punto en que comienza y termina el contacto entre la herramienta y la pieza, tal como se ilustra en la figura 3.22.

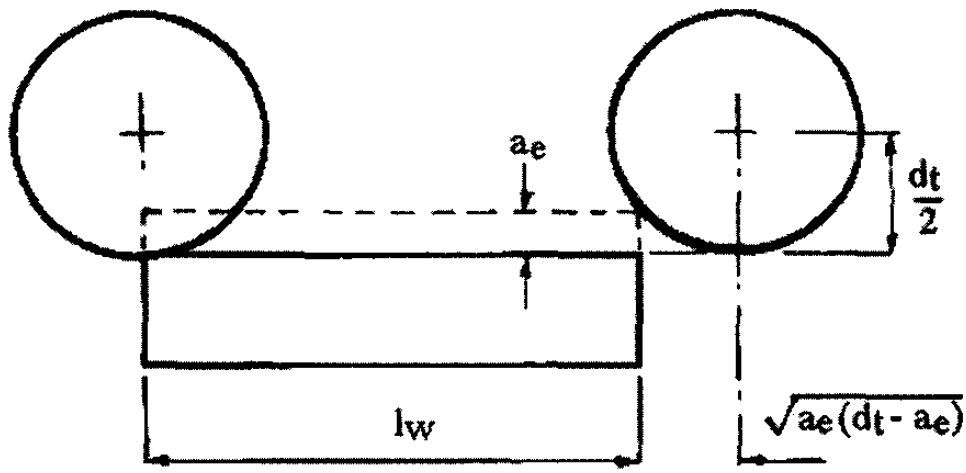

Figura 3.22 Desplazamiento de la herramienta

El material removido por unidad de tiempo es:

$$Z_w = a_e * b_w * V_f \tag{14}$$

Siendo b_w el ancho de maquinado, el cual es el mínimo entre el ancho de la herramienta y el ancho de la pieza.

Para las condiciones anteriormente descritas podemos calcular la potencia necesaria para realizar la operación de maquinado, cuyo valor está dado por la siguiente ecuación:

$$P_w = p_s * Z_w \tag{15}$$

<u>Fresado Vertical</u>

En este caso, el espesor máximo de viruta no deformada será:

$$a_{cmax} = \frac{V_f}{N * n_w} \tag{16}$$

El tiempo de maquinado está dado por:

$$t_m = \frac{L_w + d_t}{V_f} \tag{17}$$

o por

$$t_m = \frac{L_w + 2 * \sqrt{a_e * (d_t - a_e)}}{V_f} \qquad (18)$$

Dependiendo de si el eje de rotación de la herramienta pasa (1) o no (2) por sobre la pieza. Esto se ilustra en la figura 3.23, mirado desde arriba.

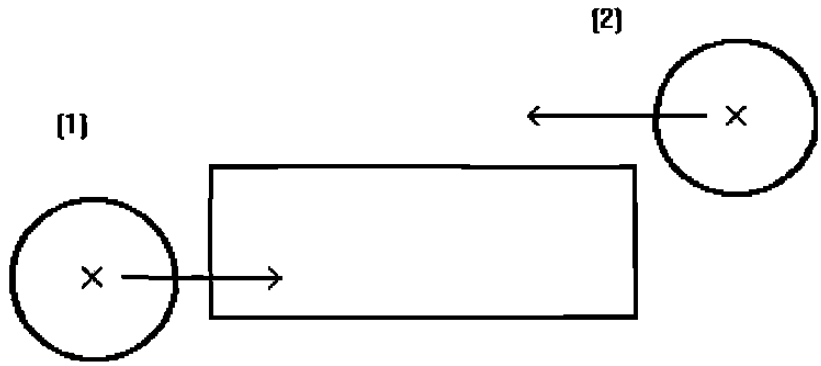

Figura 3.23 Desplazamiento de la herramienta

Proceso del trabajo al fresar

Las virutas son arrancadas en el fresado por medio de la rotación de la fresa cuyos filos están dispuestos en forma circunferencial. La fresa es una herramienta de varios filos. Para poderse introducir en el material los filos de la fresa tienen forma de cuña (como aparece con el útil del torno). El movimiento de rotación de la fresa se llama *movimiento principal o de corte*. Para conseguir el espesor de viruta la pieza ejecuta un *movimiento de avance*, lineal. Los movimientos principal y de avance son originados por la *máquina fresadora*.

Durante el fresado cada filo no está nada más que durante una parte de la revolución de la fresa, dedicado al arranque de viruta. El resto del tiempo el diente gira en vacío y puede refrigerarse. El trabajo del útil no es, por lo tanto, tan fuerte como en el caso del útil de torno cuyo filo está continuamente cortando. Figura 3.24

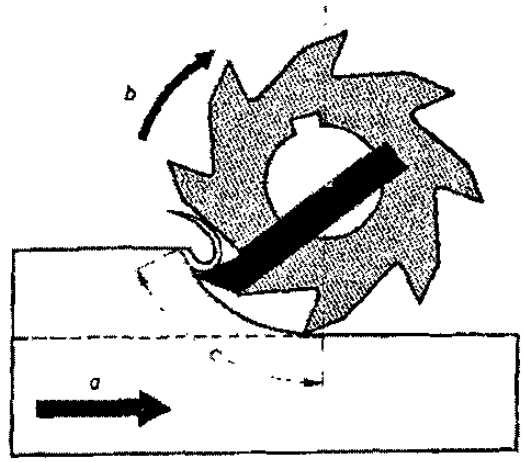

Figura 3.24 Proceso de la pieza al fresar a)Movimiento de avance; b)movimiento principal; c) camino de la pieza de un diente de fresa

Clases de fresas

Según la forma de los dientes se distingue entre fresa de dientes puntiagudos y fresas con despulla.

Fresas de dientes puntiagudos. El rendimiento de corte de la fresa y la calidad superficial de la pieza dependen principalmente de los filos de la fresa. Estos son cuneiformes y se obtienen por fresado (Figura 3.25).

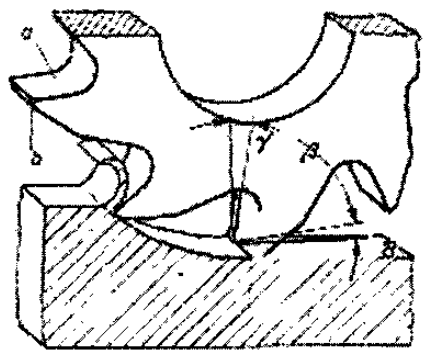

Figura 3.25 Angulos de corte en los filos de la fresadora α) Angulo de incidencia; β) Angulo de filos; γ) Angulo de ataque a) superficie de ataque; b) superficie de incidencia

La magnitud de los ángulos de corte está relacionada con el material que se vaya a trabajar (Figura 3.26 y Tabla 5). La distancia o paso entre los dientes queda también determinada por el material (Figura 3.26)

α = ángulo de incidencia
γ = ángulo de ataque
λ = ángulo de inclinación del filo respecto al eje.

Tipo de fresa	Aceros normales hasta los 75 kg/mm de resistencia					Materiales tenaces hasta de 100 kg/mm² de resistencia					Metales ligeros				
	Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte ∢			Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte ∢			Ø	N.º de dientes	Ángulos de corte ∢		
	d	z	α	γ	λ	d	z	α	γ	λ	d	z	α	γ	λ
Fresa cilíndrica	40	6	Avance en contra dirección			40	10	Avance en contra dirección			40	4	Avance en contra dirección		
	50	6				50	10				50	4			
	60	6				60	10				60	4			
	75	6	7º	10º	38º	75	12	4º	5º	35º	75	5	8º	25º	45º
	90	8	Avance paralelo			90	14	Avance paralelo			90	5	Avance paralelo		
	110	8				110	16				110	6			
	130	10				130	16				130	6			
	150	10	12º	16º	35º	150	18	8º	12º	30º	150	8	14º	30º	45º
Fresa frontal cilíndrica	40	8	Avance en contra dirección			40	12	Avance en contra dirección			40	4	Avance en contra dirección		
	50	10				50	14				50	5			
	60	10				60	14				60	6			
	75	10				75	16				75	6			
	90	12				90	18				90	6			
	110	12	7º	10º	20º	110	20	4º	5º	20º	110	7	8º	25º	35º
	130	14				150	22				130	8			
	150	16				150	24				150	10			
Fresa de disco	50	10	Avance en contra dirección			50	16	Avance en contra dirección			50	4	Avance en contra dirección		
	60	10				60	16				60	6			
	75	12				75	18				75	6			
	90	12	7º	12º	15º	90	20	5º	6º	10º	90	8	8º	25º	30º
	110	14	Avance paralelo			110	22	Avance paralelo			110	8	Avance paralelo		
	130	16				130	24				130	10			
	150	18				150	26				150	10			
	175	18	12º	18º	15º	175	28	8º	14º	12º	175	12	14º	30º	30º
	200	20				200	30				300	12			
Fresa de vástago	10	4	Avance en contra dirección			10	6	Avance en contra dirección			10	3	Avance en contra dirección		
	12	4				12	6				12	3			
	14	5				14	6				14	3			
	16	5				16	8				16	3			
	20	6				20	8				20	4			
	24	6	7º	8º	15º	24	8	4º	6º	15º	24	4	8º	20º	25º
	30	6				30	10				30	4			
	36	6				36	10				36	5			
	40	6				40	10				40	5			

Tabla 5. Angulos de corte, clase de materiales y tipos de fresas

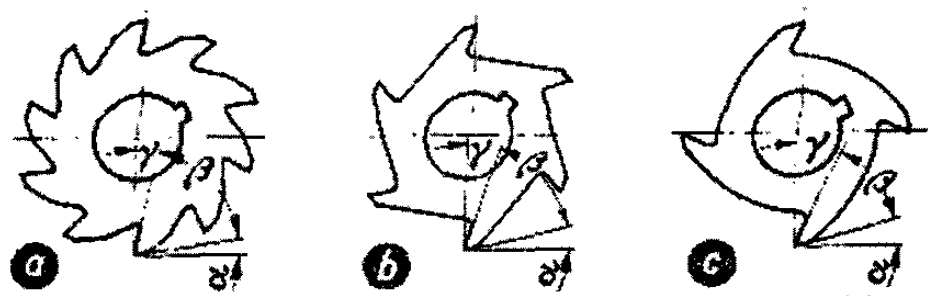

Figura 3.26 Angulos de corte y paso entre dientes para trabajo de diferentes materiales. a) El paso pequeño es apropiado para fresado de acero duro; b) un paso medio conviene para fresado de acero blando; c) el paso grande es adecuado para fresar metal ligero

Al fresar materiales blandos se pueden producir, por ejemplo, grandes cantidades de viruta que pueden ser recibidas y separadas gracias a los grandes huecos existentes entre diente y diente.

Los filos pueden estar dispuestos paralelamente al eje o tener forma helicoidal (Figura 3.27).

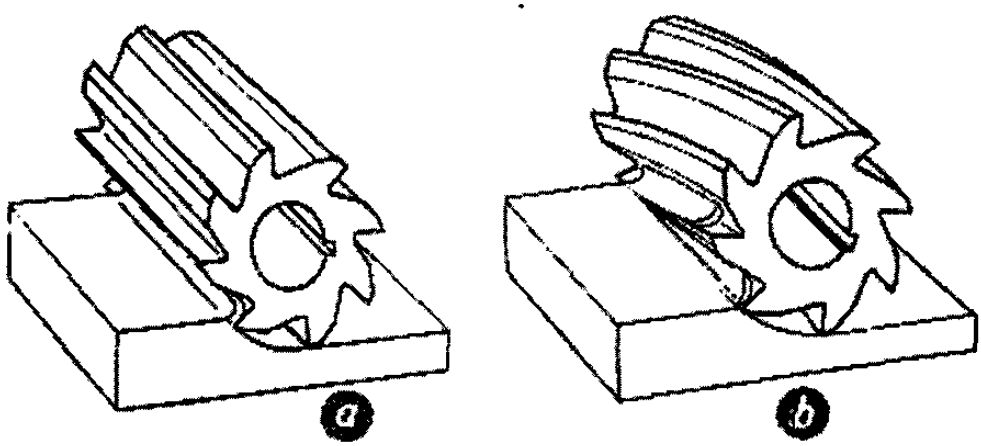

Figura 3.27 Disposición de los filos. a) Los dientes rectos abarcan la viruta en toda su anchura. En virtud de esto, la fresa trabaja a golpes, el rendimiento del corte es reducido. b) Los dientes helicoidales trabaja de modo más silencioso, mas suave, cuando sale un diente del material, hay otro que esta empezando a cortar, las virutas van separándose a un lado

Los filos helicoidales, que pueden tener inclinación a la derecha o ala izquierda, dan lugar, en el arranque de viruta, a un empuje en dirección axial (figura 3.28). Este empuje (empuje axial) debe estar dirigido contra el cabezal, pues, de lo contrario, se soltaría del husillo el vástago de la fresa.

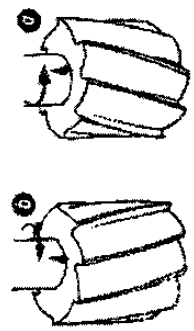

Figura 3.28 Dirección del corte y dirección del filo. a) Hélice a la derecha-corte a la izquierda; b) hélice a la izquierda – corte a la derecha

Según las Normas DIN, una fresa se dice que es de corte a la izquierda cuando gira en sentido contrario a las manecillas del reloj mirándola desde el lado del accionamiento, y que es de corte a la derecha cuando el giro es en el mismo sentido de las manecillas del reloj.

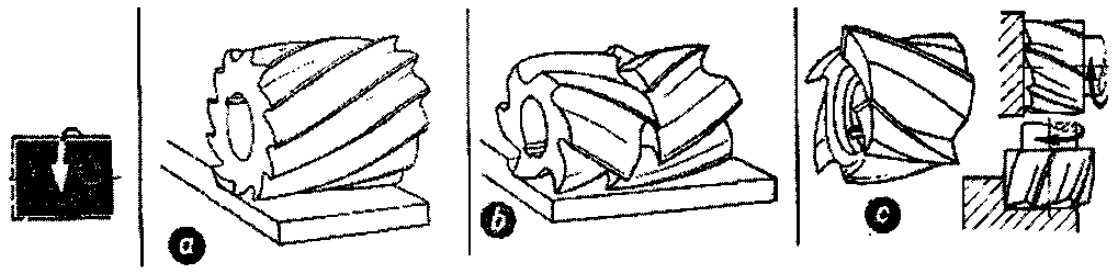

Figura 3.29 Fresas cilíndricas y fresas frontales cilíndricas. a) Las fresas cilíndricas tienen filos únicamente en su periferia. Se utilizan para desbastar y afinar superficies planas; b) Las fresas cilíndricas acopladas con dientes helicoidales de sentidos opuestos, tienen la ventaja de que el empuje axial queda en ellas parcialmente compensado; c) Las fresas frontales cilíndricas tienen dientes no solamente en la periferia, sino también en una de las caras frontales. Se prestan estas fresas para trabajar superficies planas y rebajos en ángulo recto, tanto con la fresadora horizontal como con la vertical.

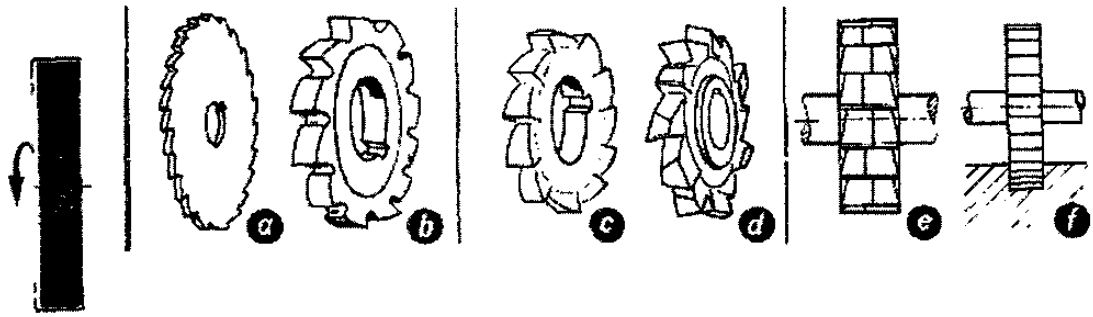

Figura 3.30. Las fresas en forma de disco se utilizan para fresar entalladuras estrechas, a) La sierra circular se utiliza para cortar piezas y para hacer en ellas ranuras estrechas, por ejemplo en las cabezas de los tornillos; b) Las fresas para ranurar con dientes rectos sirven para fresar ranuras planas. Con el objeto de evitar el roce lateral, estas van ahuecadas con la muela en ambos lados; c) Las fresas de disco de dientes triangulares son apropiadas para chiveteros más profundos; d) Las fresas de dientes cruzados van provistas de filos dirigidos alternados a la derecha y a la izquierda; e) Las fresas de discos acoplados pueden, después de haber sido afiladas, volver a su primitiva anchura mediante interposición de las convenientes arandelas; f) Fresa de disco en posición de trabajo.

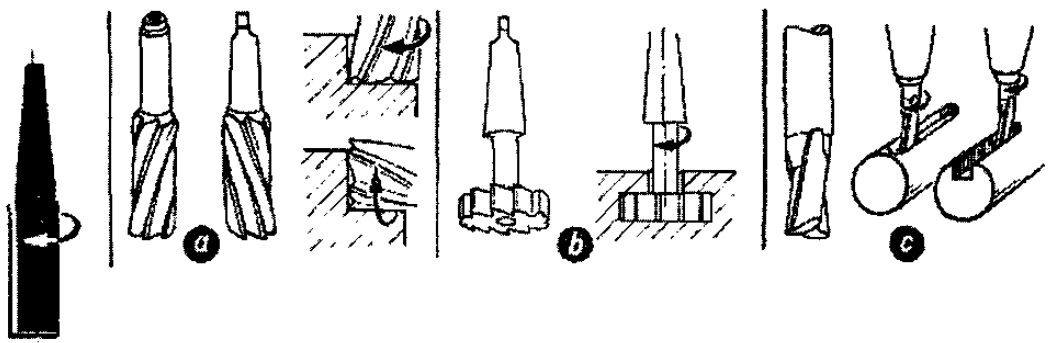

Figura 3.31. Fresa con vástago. a) Las fresas de vástago son fresas frontales cilíndricas de pequeño diámetro. El vástago o mango sirve para sujeción. Las fresas de vástago con corte a la derecha y hélice o las de corte a la izquierda con hélice, pueden salirse del husillo como consecuencia del empuje axial. Para evitar esto, el mango de la fresa va provisto de una rosca de apriete que sirve para fijarla en el husillo de fresar. Los mangos de fresa provistos de lengüeta de arrastre no se usan generalmente nada más que para cortes ligeros; b) Las fresas de vástago para ranuras se prestan para la ejecución de ranuras en T; c) Las fresas para agujeros rasgados tienen dos filos y se utilizan para el fresado de chaveteros y de agujeros rasgados.

149821

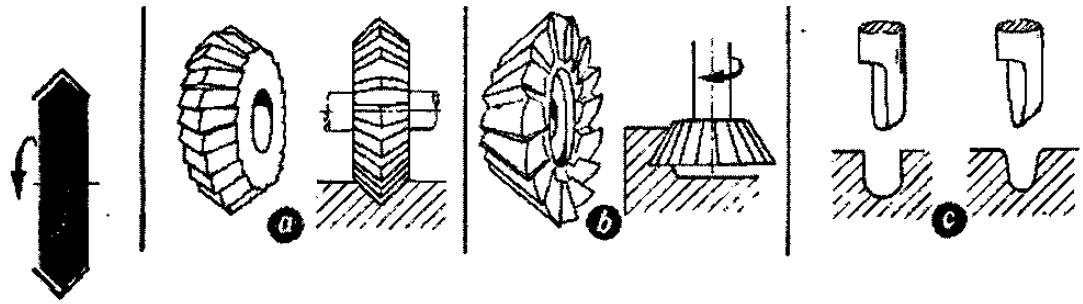

Figura 3.32. Fresas de forma. a) Las fresas angulares son necesarias para la ejecución de guías prismáticas; b) La fresa frontal angular se utiliza en el maquinado de guías en ángulo; c) Las fresas de un solo filo se utilizan para pequeños trabajos de fresado de forma.

Platos de cuchillas

Los cortes van fijados en forma de cuchillas en un cuerpo o cabezal, pudiéndose reponer por separado en caso de deterioro. Se emplean estos platos de cuchillas para el fresado frontal de grandes superficies. Ver figura 3.33

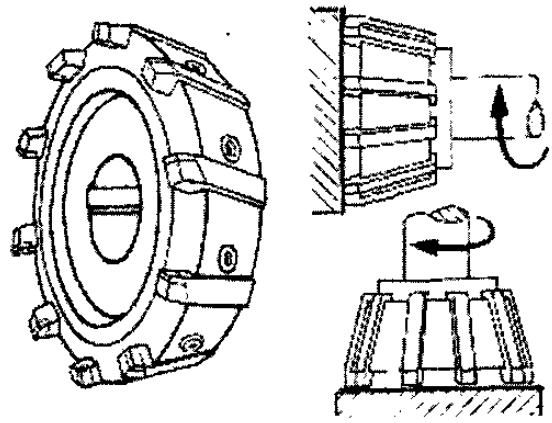

Figura 3.33 Plato de cuchillas

Fresas con despulla

Para fresar superficies curvas no se pueden emplear las fresas de dientes en punta, ya que al afilar la fresa se cambiaría su perfil. Para curvas, arcos circulares y toda clase de perfiles, así como, con frecuencia, también para fresado de ranuras, se emplean estas fresas de forma retorneadas. El retorneado resulta necesario para mantener el ángulo de incidencia. El ángulo de ataque vale, generalmente, 0°. Ver figura 3.34 y 3.35

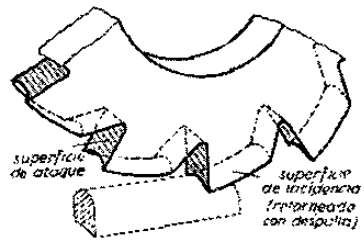

Figura 3.34 Forma de los filos en una fresa con despulla

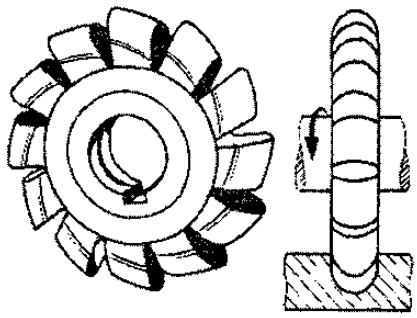

Figura 3.35 Fresa de forma con despulla

Fresa compuesta

Se designan con el nombre de compuestos aquellos útiles de fresar que están constituidos a base de la reunión de varias fresas de dientes puntiagudos o de fresas con despulla de diámetros diversos. Se pueden fresar así, de una vez, perfiles de más variadas formas. El empleo de fresas compuestas brinda multitud de posibilidades en el trabajo y ahorra el uso de fresas de forma, más caras. Ver figuras 3.36 y 3.37

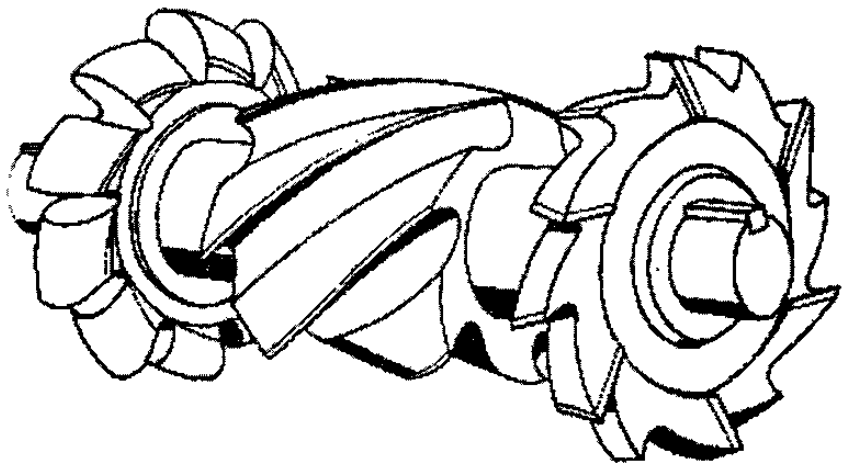

Figura 3.36 Fresa compuesta, formada a base de una fresa de disco de dientes cruzados, de una fresa cilíndrica y de una fresa de forma de despulla.

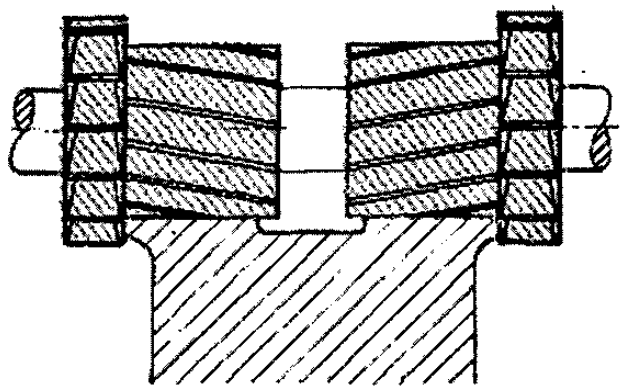

Figura 3.37 Fresa compuesta formada por dos fresas de disco, una fresa cilíndrica con hélice a la izquierda y otra con hélice a la derecha, para neutralizar el empuje axial

3.4 Fluidos para corte.

Cuando se utilizan herramientas de acero de alta velocidad, se genera calor al realizarse el corte entre la herramienta y el material de la pieza de trabajo debido a la gran fricción que existe entre ambas.[3, 13]

Debido a esto se incrementa la temperatura de la pieza y la herramienta de corte, siendo mucho mayor la de la herramienta, ocasionándose un daño tanto a la herramienta como a la pieza de trabajo. Estos daños en las herramientas ocasionados por las altas temperaturas se presentan cuando la temperatura de trabajo se acerca o excede la temperatura del tratamiento térmico que se le había aplicado a la herramienta, por consiguiente el material de la herramienta se ablanda perdiendo así el filo y su dureza.

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.
2) La fricción en las interfases 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, 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.

A continuación se presenta la tabla 6 que nos muestra las temperaturas de trabajo para las cuales están diseñadas para las herramientas de corte que pueden encontrarse tanto en tornos como fresas.

Tabla 6 Diferentes herramientas y la temperatura de trabajo según diseño.

Herramienta	Composición	Temperatura
WS. Acero de herramientas. También se les conoce como acero al carbono.	No aleado. 0.5 a 1.5% de contenido de carbón.	Soportan sin deformación o pérdida de filo 250°C.
SS. Aceros de herramienta aleados. También se les conoce como aceros rápidos.	Con wolframio, cromo, vanadio, molibdeno y otros.	Soporta hasta 600°C.
HS. Metales duros aleados. Son pequeñas plaquitas que se unen a metales corrientes para que los soporten.	Con cobalto, carburo de carbono, tungsteno, wolframio y molibdeno.	Soportan hasta 900°C.
Diamante. Se utiliza como punta de algunas barrenas o como polvo abrasivo.		Material natural que soporta hasta 1800°C.
Materiales cerámicos. Por lo regular se utilizan para terminados.		Se aplica en herramientas de arcilla que soportan hasta 1500°C.

FLUIDOS DE CORTE.

Durante el proceso de maquinado se genera fricción y con ello calor, lo que puede dañar a los materiales de las herramientas de corte por lo que es recomendable utilizar fluidos que disminuyan la temperatura de las herramientas. Con la aplicación adecuada de los fluidos de corte se disminuye la fricción y la temperatura de corte con lo que se logra lo siguiente:

Ventajas económicas.

1. Reducción de costos
2. Aumento de velocidad de producción
3. Reducción de costos de mano de obra
4. Reducción de costos de potencia y energía
5. Aumento en la calidad de acabado de las piezas producidas

Características de los líquidos para corte.

1. Buena capacidad de enfriamiento
2. Buena capacidad lubricante
3. Estabilidad (larga duración sin descomponerse)
4. No tóxico
5. Transparente (permite al operario ver lo que está haciendo)
6. Viscosidad relativamente baja
7. No inflamable

En la tabla 7 se muestran los fluidos más comunes para corte:

Tabla 7 Fluidos para corte

Fluido	Características
Aceite Activo para corte	• Aceites minerales sulfurados (0.5 a 0.8% de S) • Aceites minerales sulfoclorinados (3% S y 1% Cl) • Mezclas de aceites grasos sulfoclorinados (más del 8% de S y 1% Cl)
Aceites de corte inactivos	• Aceites minerales simples • Aceites grasos o animales • Mezclas de aceites animales y minerales • Mezclas de aceites animales y minerales sulfurados
Aceites emulsificantes (solubles)	Aceites minerales solubles al agua. Contienen un material parecido al jabón que permite la dilusión en el agua se agregan de los concentrados de 1 a 5 partes de concentrado por cada 100 partes de agua.
Fluidos sintéticos para el corte	Emulsiones estables que contienen un poco de aceite y se mezclan con facilidad con el agua. Existen varios tipos de fluidos sintéticos para corte, los mejores son aquellos conocidos como de alta precisión y funcionan con reacciones químicas de acuerdo con el material que estén enfriando.