
INTRODUCCIÓN

Los Procesos de Conformado por Eliminación de Material, habitualmente denominados Procesos de Mecanizado, se caracterizan por la obtención de la geometría final de la pieza mediante la eliminación del material sobrante de una preforma de partida.

Según el método empleado en la eliminación del material, pueden considerarse incluidas dentro de los procesos de mecanizado las dos siguientes categorías de procesos.

Procesos Convencionales. La eliminación de material se realiza fundamentalmente por medios mecánicos. Los procesos de torneado, fresado y taladrado, pertenecen a este grupo.

Procesos No Convencionales. La eliminación de material se debe fundamentalmente a otros medios diferentes de los mecánicos (eléctricos, físico-químicos, etc.). Procesos pertenecientes a este grupo son la electroerosión y el fresado químico entre otros.

Los procesos de mecanizado constituyen, en la actualidad, el conjunto de procesos de fabricación más ampliamente difundidos en la industria. Ello es debido, entre otras razones, a su gran versatilidad en la obtención de diferentes tipos de geometría y al nivel de precisión dimensional obtenido en comparación con otros procesos.

Esta difusión ha sido causa, entre otras razones, de que los equipos propios de mecanizado hayan experimentado una evolución más acusada que los restantes en el campo de la automatización, siendo las Máquinas-Herramienta de Control Numérico el más claro exponente de este hecho.

ELEMENTOS DE UN PROCESO DE MECANIZADO CONVENCIONAL

La realización de un Proceso de Mecanizado, requiere la intervención de los siguientes elementos:

- Pieza
- Herramienta
- Máquina-Herramienta
- Utillaje
- Sistema de control

Pieza

El término genérico "pieza" representa el elemento material objeto de la transformación durante la ejecución del proceso. En su estado inicial o **preforma**, la geometría de la pieza presenta unas **creces**, que suponen una sobredimensión respecto a las dimensiones finales a obtener. En la mayoría de las situaciones, el material sobrante se elimina en una serie de operaciones sucesivas que van aproximando la geometría de la preforma a la de la pieza terminada. Las operaciones intermedias de este proceso se designan genéricamente como operaciones de **desbaste**, mientras que la última de tales operaciones se designa como operación de **acabado**. Una vez alcanzada la forma geométrica final, la pieza debe

encontrarse dentro de las especificaciones dimensionales del diseño (tolerancias dimensionales, tolerancias de forma y posición, acabado superficial, etc.)

Aparte de las especificaciones dimensionales la "pieza" debe cumplir otras especificaciones de diseño tales como propiedades mecánicas. Estas propiedades serán asimismo un condicionante a la hora de elegir el proceso y la forma en la que éste será llevado a cabo.

Herramienta

Es el elemento que entra en contacto directo con la pieza y produce la eliminación del material sobrante de la preforma.

Una herramienta consta, en general, de una o varias aristas o filos, materializadas por la intersección de superficies, generalmente planas. Entre estas superficies, resultan de mayor interés la denominada **cara de incidencia**, aquélla que queda enfrentada a la superficie mecanizada de la pieza y la **cara de desprendimiento**, aquélla por la que se desprende el material eliminado o **viruta**. Las aristas se denominan **aristas o filos de corte**.

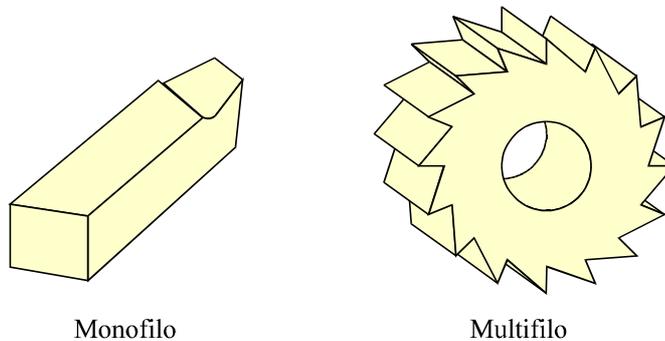


Figura 1.- Herramientas de mecanizado

La tipología existente de herramientas es muy amplia, ya que depende, entre otras, de la operación a realizar y condiciones de la misma, de la máquina-herramienta en el que se desarrolla dicha operación y de las propiedades que se pretenden conseguir en la pieza una vez finalizado el proceso. En función del número de aristas de corte es frecuente considerar una primera clasificación de herramientas en **herramientas monofil**, tales y como las empleadas en operaciones de torno, y **herramientas multifilo**, tales y como las empleadas en operaciones de fresado. La herramienta se completa con una parte no activa que permite su fijación a los elementos de sujeción de la máquina-herramienta.

Según su construcción pueden considerarse **herramientas enterizas**, cuando toda la herramienta es del mismo material y **herramientas de plaquitas** cuando la parte activa y el resto de la herramienta son de materiales diferentes. Se denominan de esta forma porque la parte activa suele tener forma de pequeñas placas que se unen al mango o al cuerpo de la herramienta mediante soldadura o medios de fijación mecánica (tornillos, bridas, etc.).

Maquina-Herramienta

Una máquina-herramienta puede considerarse constituida por el conjunto de dispositivos que permiten el desplazamiento relativo entre la pieza y la herramienta y la eliminación del

material sobrante de la preforma. Estos dispositivos pueden agruparse dentro de las siguientes categorías:

Dispositivos de sujeción: Son aquéllos que tienen como misión asegurar que la pieza o la herramienta se mantienen en posiciones tales que permiten la eliminación de material. Ejemplos de tales dispositivos son: platos de garras, mordazas, mesa portaherramientas, conos de sujeción, etc.

Dispositivos de accionamiento: Son aquéllos encargados de realizar el desplazamiento relativo entre la pieza y la herramienta: Motor, transmisiones, husillos, etc.

Uillaje

Es todo conjunto, generalmente mecánico, que cumple misiones de posicionamiento, fijación o cualquier otra función auxiliar en relación con la pieza, la herramienta, o su movimiento relativo.

Algunos de los elementos considerados como partes integrantes de las máquinas-herramienta, pueden ser considerados a su vez como utillaje. Este sería el caso de un plato de garras en un torno, o una mordaza en una fresadora. Normalmente este tipo de utillaje, al ser estándar en la mayoría de las máquinas-herramienta de un cierto tipo, suele ser considerado como parte integrante de dichas máquinas, reservándose la denominación de utillaje para aquellos elementos específicos utilizados en cada proceso concreto.

Sistema de Control

Engloba los dispositivos encargados de controlar los desplazamientos relativos entre pieza y herramienta. En las máquinas convencionales el control suele ser realizado por acciones del operario (tornero, fresador) sobre los dispositivos que a tal efecto cuenta la máquina-herramienta (volantes, botoneras, palancas de control, etc.). En las máquinas de control numérico, este tipo de acciones quedan relegadas al propio control de la máquina sin que se produzca una intervención directa del operario sobre el proceso de eliminación de material.

MATERIALES DE PIEZAS Y HERRAMIENTAS

Materiales de Piezas

El material de la pieza a mecanizar es uno de los condicionantes esenciales para la viabilidad del proceso. No obstante, aun conociendo sus propiedades físicas, no resulta sencillo predecir su comportamiento en un proceso de mecanizado debido al elevado número de factores que inciden sobre él. Existen recopilaciones experimentales que recogen las condiciones de trabajo más habituales para diferentes operaciones de mecanizado y tipos de materiales. No obstante, los valores recomendados difícilmente se ajustan a una situación particular, aunque sirven como punto de partida para el ajuste final a la situación productiva concreta. Desde el punto de vista de la industria aeronáutica, los grupos de materiales de mayor interés son los constituidos por Aceros, Aceros inoxidables, Aleaciones termoresistentes (base Fe, Ni, Co), y aleaciones ligeras (Al, Ti, Mg).

Para caracterizar el comportamiento de un determinado material suele emplearse el concepto de **maquinabilidad**, entendida como la aptitud que presenta éste para ser mecanizado. El

término procede del inglés "*machinability*" y probablemente una traducción más adecuada sería la de "mecanizabilidad". No obstante, y dado que el término maquinabilidad se encuentra ampliamente extendido, se continuará en lo sucesivo con esta designación.

Tal y como se ha indicado, el concepto de maquinabilidad presenta ambigüedad si no va acompañado de una situación concreta de proceso. Aun así, los enfoques que puedan darse al término "aptitud del material" pueden resultar muy diversos. Por todo ello resulta complicado establecer un valor que cuantifique la maquinabilidad, debiendo buscarse en cada caso aquel que mejor se ajuste a los requerimientos exigidos al proceso.

De una forma general pueden enumerarse una serie de factores ligados al material de la pieza que inciden directamente sobre la maquinabilidad. La cuantía de dicha incidencia, incluso el efecto producido, deberán establecerse en cada situación concreta. Entre estos pueden mencionarse

- Composición química
- Estructura
- Comportamiento térmico

La **composición química** del material de la pieza condiciona una gran parte de las propiedades mecánicas, que influyen en la maquinabilidad. Así la maquinabilidad de un metal puro o de una aleación con base ese mismo metal, puede sufrir grandes variaciones incluso para pequeños porcentajes de elementos aleantes. El acero, como aleación Fe-C, puede resultar un claro ejemplo de este hecho.

Dentro de la composición química del material debe considerarse la presencia de elementos de aleación. Puede decirse que, la presencia de tales aleantes (Cr, Co, Ni, Mn, Mo, V, etc.) suele por lo general, influir negativamente en la maquinabilidad, por la modificación de las propiedades físicas que suponen. Una excepción en esta regla puede considerarse la presencia de S, Pb, P ó Se que, bien como elementos de aleación, bien como aditivos libres, pueden facilitar la eliminación de material.

Aunque inicialmente no formen parte de la composición química del material, las inclusiones que pueda presentar se encuentran estrechamente ligadas a dicha composición. Cabe distinguir entre macroinclusiones y microinclusiones, siendo 0,1 mm un valor frontera normalmente aceptado entre ambos tipos.

Las macroinclusiones suelen ser debidas a impurezas procedentes del proceso previo de obtención del material. Su naturaleza resulta por tanto muy diversa, pero por lo general, producen una reducción de la maquinabilidad. Las microinclusiones, habitualmente constituidas por óxidos (Al_2O_3 , FeO, MnO etc.), suponen un efecto negativo sobre la maquinabilidad, aunque puedan darse excepciones como en el caso de los silicatos que en valores elevados de velocidad de corte, producen una capa que protege de la abrasión la cara de desprendimiento de la herramienta.

La **estructura** del material implica que, materiales con la misma composición química, pueden presentar diferentes comportamientos desde el punto de vista de la maquinabilidad. El tamaño y orientación del grano, la forma y distribución de los elementos aleados, los estados tensionales originados (endurecimiento por deformación) en procesos de conformación

previos, o la acritud son algunos de los factores más significativos a considerar dentro de este grupo.

El **comportamiento térmico** puede ser contemplado desde dos puntos de vista. El primero de ellos se establece a partir de la conductividad térmica del material que facilitará o dificultará la eliminación de calor de la zona de deformación. En este sentido valores crecientes de conductividad térmica mejoran la maquinabilidad. El segundo punto de vista tiene que ver con las modificaciones que un incremento de temperatura puede producir en las propiedades mecánicas o incluso en la composición química o la estructura del material.

Materiales de Herramientas

Existe una amplia variedad de materiales empleados en la parte activa de la herramienta. La elección de uno u otro tipo depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material a mecanizar y de los requerimientos del proceso a realizar. Por lo general, se requiere una elevada dureza y una elevada resistencia al desgaste que permitan la eliminación continua de material. Resulta esencial que estas propiedades se mantengan en caliente debido al incremento de temperatura producido en la zona de corte como consecuencia del rozamiento entre la pieza y la herramienta. Este hecho descarta el uso de materiales tales como los aceros al carbono, al no mantener unas propiedades de dureza aceptables en caliente.

Como materiales más usuales de la parte activa de la herramienta pueden considerarse los siguientes grupos:

- Aceros rápidos
- Carburos metálicos
- Materiales cerámicos
- Cermets
- Materiales diamantados

Los **aceros rápidos**, denominados así por permitir altas velocidades de mecanizado en relación a otros aceros, están constituidos por un grupo de aceros con un contenido en carbono entre el 0,7% y el 0,9% y una serie de elementos de aleación tales como cobalto (5%÷17%), wolframio (18%÷18,5%), cromo (4%÷4,5%), molibdeno (0,5%÷1,1%) y vanadio (0,8%÷2,5%), que les confieren sus propiedades de dureza y resistencia al desgaste en frío y en caliente. Para herramientas de geometría compleja estos aceros se obtienen por sinterizado.

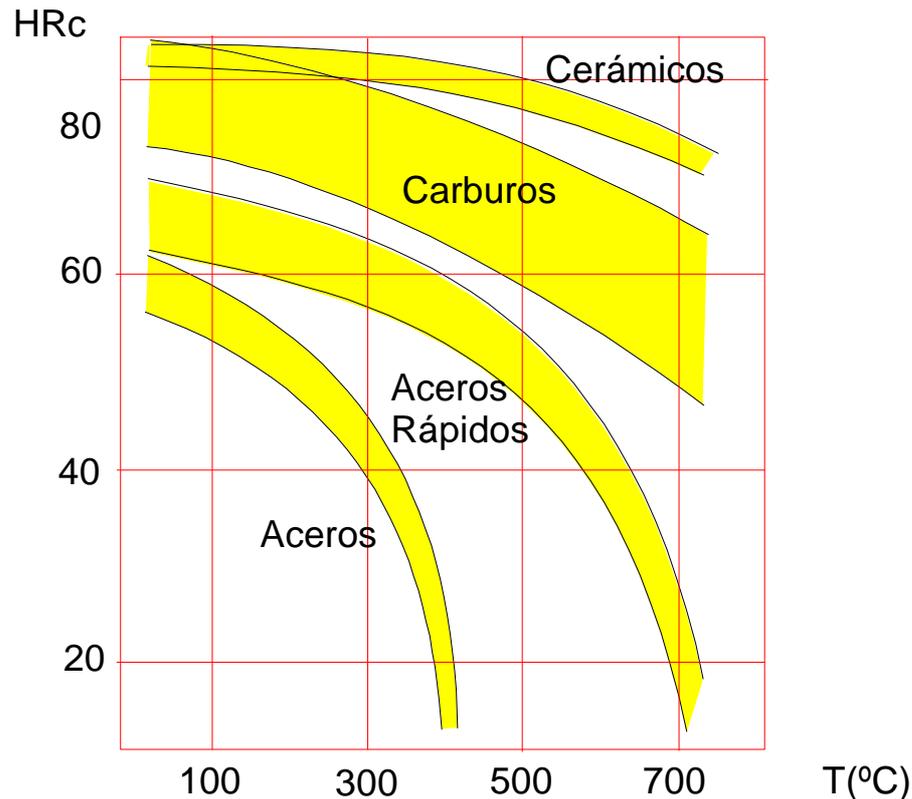
Los **carburos metálicos**, también denominados **metales duros**, están constituidos por carburos de wolframio con adición de cobalto, carburos de titanio y carburos de tántalo. Presentan unos valores elevados de dureza y resistencia al desgaste en comparación con los materiales previamente mencionados. En la actualidad se trabaja en diferentes tipos de recubrimientos de estos materiales. Entre estos recubrimientos destacan el nitruro de boro, que confiere a la herramienta una dureza y una resistencia al desgaste muy elevadas. Los carburos metálicos son, junto con los aceros rápidos, los materiales más ampliamente utilizados.

Los **materiales cerámicos** tienen alúmina (Al_2O_3) o nitruro de silicio (Si_3N_4) como constituyentes básicos. Presentan una elevada dureza así como una gran fragilidad, hecho este que limita en gran medida su campo de aplicación. Existen materiales designados como

cermets, que son una mezcla de materiales cerámicos (TiC) y metales (Co, Ni, Mo) obtenida mediante sinterizado.

Los **materiales diamantados** emplean diamante en polvo y aglutinante como elementos básicos. Presentan la máxima dureza frente a los restantes materiales, aunque poseen una gran fragilidad y un elevado coste como principales inconvenientes.

En la siguiente gráfica se recogen a título orientativo valores usuales de dureza y temperatura para algunos de los grupos de materiales considerados



MOVIMIENTO RELATIVO PIEZA/HERRAMIENTA

Para poder eliminar el material sobrante de la preforma es necesario que la pieza y la herramienta posean un movimiento relativo. En la práctica, y en cada proceso concreto, bien una u otra, o en algunos casos ambas, son quienes realmente se desplazan. A efectos de facilitar el estudio cinemático del movimiento relativo pieza/herramienta, se considera que la pieza permanece inmóvil, mientras que la herramienta es quien describe el movimiento relativo. Este movimiento suele descomponerse en tres movimientos denominados:

- Movimiento principal
- Movimiento de avance
- Movimiento de penetración

El **movimiento principal** es el responsable de la eliminación del material. Consume la mayor parte de la potencia empleada en el proceso.

El **movimiento de avance** es el responsable de un arranque continuo de material, marcando la trayectoria que debe seguir la herramienta a tal fin.

El **movimiento de penetración** suele ser un movimiento previo al inicio del proceso que posiciona inicialmente pieza y herramienta, siendo responsable de la cantidad de material eliminado.

El siguiente cuadro resume los parámetros cinemáticos asociados a cada uno de los movimientos considerados, así como sus unidades y sus órdenes de magnitud

	MOVIMIENTO PRINCIPAL	MOVIMIENTO DE AVANCE	MOVIMIENTO PENETRACIÓN
PARÁMETRO	Velocidad de corte	a) Avance b) Velocidad de avance	Profundidad de pasada
SÍMBOLO	[v]	a) [f] b) [v _f]	[a _p]
UNIDADES	m/min	a) mm b) mm/min	mm
ORDEN DE MAGNITUD⁽¹⁾	Acero rápido: hasta 50 m/min Metal Duro: hasta 200 m/min Diamante: hasta 1000 m/min	Desbaste⁽²⁾: hasta 3 mm/rev Acabado⁽²⁾: menos de 0,2 mm/rev	Desbaste⁽²⁾: hasta 10 mm Acabado⁽²⁾: menos de 1 mm

(1) Estos valores deben interpretarse a título orientativo para el mecanizado de acero, pudiendo experimentar grandes variaciones en función del proceso considerado, del material de pieza y herramienta, de la potencia y máquina-herramienta utilizada, etc.

(2) Considerando un proceso de torneado convencional

El movimiento resultante de corte es la suma de los movimientos principal y de avance (recuérdese que el movimiento de penetración es un movimiento previo al proceso de eliminación de material propiamente dicho). Así se tiene que la velocidad resultante de corte \vec{v}_{rc} es:

$$\vec{v}_{rc} = \vec{v} + \vec{v}_f$$

En general se cumple que el módulo de la velocidad de avance es mucho menor que el de la velocidad de corte por lo que suele ser práctica habitual considerar

$$v_{rc} \approx v$$

CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS-HERRAMIENTA

Las máquinas-herramienta (M-H) pueden ser clasificadas según muy diversos criterios. Atendiendo a que el movimiento principal sea de rotación o de traslación y a que éste lo lleve la pieza o la herramienta, puede considerarse la siguiente clasificación, en la cual se incluye el tipo de herramienta normalmente empleado: (1) = Monofilo, (2) = Multifilo

Máquina- Herramienta	Traslación	Herramienta	Limadora	1
			Mortajadora	1
			Brochadora	2
	Rotación	Pieza	Cepillo	1
			Torno	1
			Herramienta	Taladradora
Fresadora	2			
Mandrinadora	1			
			Rectificadora	2

Se describen a continuación algunas de las características más representativas de las máquinas-herramienta incluidas en la anterior clasificación.

Limadora

Es una máquina-herramienta con movimiento principal de traslación. Permite el mecanizado de superficies planas o de ranuras en una dirección paralela a la del desplazamiento de la herramienta monofilo. Este desplazamiento se realiza en sucesivos ciclos de avance y retroceso de la herramienta. En el avance, la herramienta elimina material, mientras que en el retroceso vuelve a su posición inicial de ciclo sin eliminación de material. La velocidad de corte no es constante debido al accionamiento con que cuenta la máquina-herramienta. Este accionamiento permite que los retrocesos se realicen en un tiempo inferior que los avances a fin de obtener un mayor tiempo de corte a lo largo del proceso. El trabajo en la limadora no permite obtener buenos acabados superficiales, siendo normalmente desarrollado como una operación de desbaste previa a otras operaciones de acabado realizadas en otras máquinas-herramienta tales como la fresadora. La figura 2 muestra un ejemplo de una limadora.

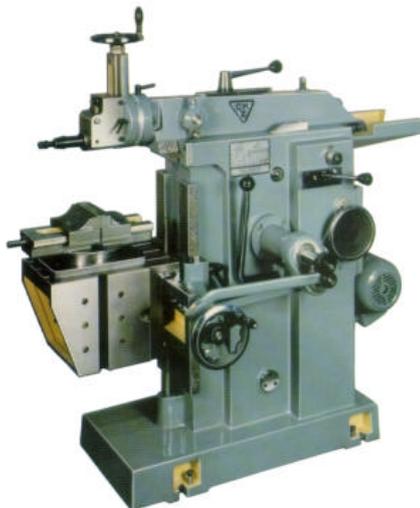


Figura 2.- Limadora

Mortajadora

Cinemáticamente trabaja de forma similar a la de la limadora o el cepillo, es decir, la herramienta posee un movimiento alternativo de avance y retroceso que posibilita el mecanizado de superficies planas paralelas a la dirección de corte. El eje de desplazamiento de la mortajadora es vertical por lo que permite el mecanizado de piezas de mayores dimensiones que la limadora, así como el trabajo de ranuras interiores. La figura 3 recoge un ejemplo de mortajadora.



Figura 3.- Mortajadora

Brochadora

A diferencia de las tres máquinas-herramienta anteriores, que emplean herramientas monofilo, la brochadora emplea una herramienta multifilo denominada brocha. La brochadora se utiliza en el mecanizado de ranuras de forma, tanto en interiores como en exteriores. La brocha posee una sección con la forma geométrica final que se desea alcanzar en la ranura. Esta sección se reproduce a lo largo del eje de la herramienta en secciones semejantes, diferenciadas por un factor de escala. De esta forma se "reparte" el trabajo de mecanizado entre las diferentes secciones hasta conseguir, que en un sólo paso de la herramienta por la pieza, se obtenga la geometría final de la ranura. La figura 4 muestra una brochadora vertical de exteriores.

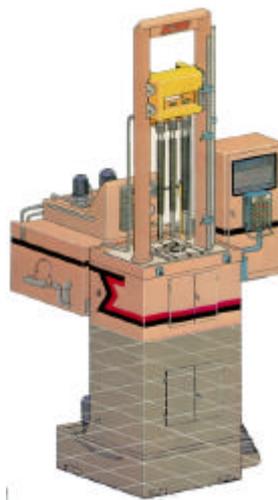


Figura 4.- Brochadora vertical de interiores

Cepillo

Tiene un funcionamiento cinemáticamente similar al de la limadora, de ahí que su campo de aplicación sea también el trabajo en desbaste de superficies planas o de ranuras. A diferencia de la limadora, el movimiento principal lo lleva la pieza, siendo la velocidad de corte constante durante los semiperiodos de avance y retroceso. Las dimensiones del cepillo son mayores que las de la limadora, y por lo general, se emplea en el mecanizado de piezas de mayor tamaño.

La figura 5 muestra un ejemplo de cepillo.

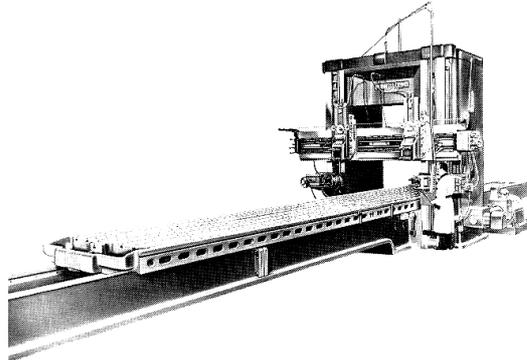


Figura 5.- Cepillo

Torno

El torno emplea una herramienta monofilo y un movimiento de rotación de la pieza para la eliminación del material. Es, junto con la fresadora, la máquina-herramienta más universal y versátil. Permite el mecanizado de superficies de revolución con unos grados de acabado superficial suficientemente buenos si la elección de las condiciones de corte se realiza adecuadamente. Permite asimismo la obtención de superficies planas perpendiculares al eje de rotación de la pieza y otra serie de trabajos que serán descritos más adelante. El torno más habitual, denominado torno paralelo, se recoge en la figura 6.

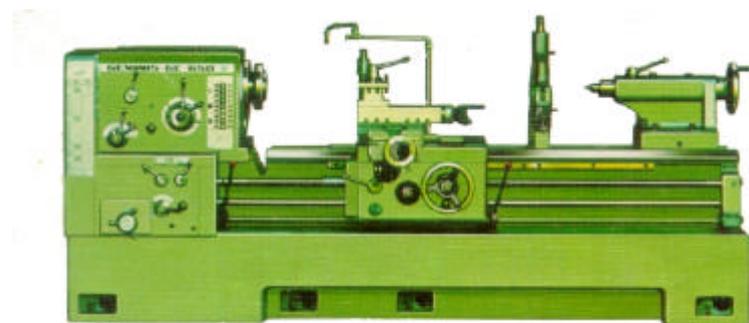


Figura 6.- Torno paralelo

Taladradora

Tal y como su nombre indica, la taladradora se utiliza para la realización de orificios o taladros en las piezas. El movimiento principal de rotación, perpendicular a la superficie de apoyo de la pieza, lo lleva la herramienta, que es además quien se desplaza paralelamente al eje de rotación. Para conseguir el movimiento de avance. La herramienta más comúnmente

empleada es la broca, cuyo diámetro es variable en función de las dimensiones del taladro que se desee obtener. La precisión dimensional de los taladros realizados con broca suele ser más bien baja, requiriéndose el empleo de otras herramientas, o incluso de otras máquinas-herramienta, cuando dicha precisión es necesaria. La figura 7 muestra un ejemplo de taladradora de columna.



Figura 7.- Taladradora de columna

Fresadora

La fresadora, cinemáticamente funciona de manera similar a la taladradora, incorporando un desplazamiento de la pieza en su plano de apoyo. Esto permite un movimiento relativo entre pieza y herramienta según los tres ejes de coordenadas X, Y, y Z y posibilita el mecanizado de superficies planas o curvas así como todo tipo de ranurados y taladros en la pieza. Las figuras 8 y 9 muestran un ejemplo de fresadora con herramienta horizontal y fresadora con herramienta vertical respectivamente.



Figura 8.- Fresadora horizontal



Figura 9.- Fresadora vertical

Mandrinadora

Es una máquina-herramienta que comparte cierta similitud con la taladradora y con la fresadora. De hecho existen máquinas-herramienta denominadas fresadoras-mandrinadoras.

La mandrinadora es una máquina normalmente de eje horizontal, pudiendo realizar trabajos completamente análogos a los desarrollados por la fresadora horizontal. La característica más destacada de la mandrinadora es la herramienta empleada, denominada barra de mandrinar ó mandrino. Consiste en un eje, sujeto por ambos extremos a la máquina-herramienta, en el que pueden acoplarse varias herramientas monofilo situadas en planos perpendiculares a dicho eje. La rotación del eje permite mecanizar (mandrinar) varios taladros simultáneamente, asegurando de forma relativamente precisa la coaxialidad de los mismos. La figura 10 muestra un ejemplo de mandrinadora.



Figura 10.- Mandrinadora

Rectificadora

La rectificadora emplea una herramienta especial denominada muela. La muela puede considerarse como una herramienta multifilo, aunque a diferencia de las herramientas multifilo convencionales, está constituida por granos de un material abrasivo unidos mediante un elemento aglutinante. La rectificadora se emplea casi exclusivamente en operaciones de acabado, obteniéndose unos valores de tolerancias superficiales y grado de acabado superficial superiores a los obtenidos en las operaciones realizadas en las máquinas-herramienta previamente descritas. La figura 11 muestra una rectificadora planificadora.



Figura 11.- Rectificadora planificadora

PARÁMETROS Y VARIABLES ASOCIADAS AL CORTE

Cualquier proceso de mecanizado puede asimilarse a una situación tal y como la mostrada en la figura 12. En ella puede apreciarse como la herramienta produce la eliminación del material de la pieza mediante la incidencia de la arista o filo de corte sobre ésta, desplazándose con una velocidad relativa v , que es la velocidad resultante de corte.

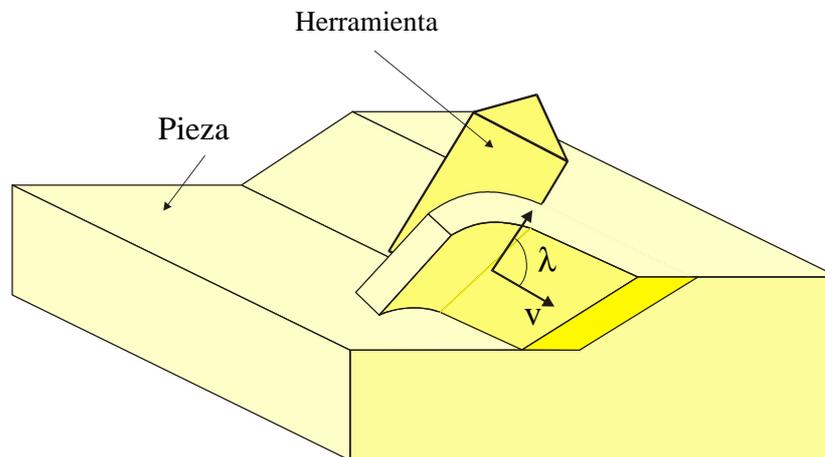


Figura 12.- Esquema de proceso de mecanizado

El ángulo formado por la dirección de la velocidad resultante de corte y la arista de corte recibe el nombre de **ángulo de inclinación**(λ). Cuando $\lambda=90^\circ$ el modelo de corte se conoce como **corte ortogonal**, mientras que para $\lambda \neq 90^\circ$ el modelo de corte se denomina **corte oblicuo**.

En general, los procesos de mecanizado siguen el modelo de corte oblicuo, aunque en la práctica es frecuente considerar el modelo de corte ortogonal por su mayor sencillez de cálculo y porque el ángulo de inclinación se aproxima bastante al valor de corte ortogonal.

Sección normal a la arista de corte

Si se supone un modelo de corte ortogonal, en una sección cualquiera de la pieza y la herramienta perpendicular a la arista de corte, se tiene la situación mostrada en la figura 13.

Sobre ella pueden definirse los siguientes parámetros geométricos: (nótese que los valores angulares que a continuación se definen dependen del plano de sección elegido, que en este caso es perpendicular a la dirección de la arista de corte).

Ángulo de filo (b): Es el ángulo formado por las caras de incidencia y desprendimiento de la herramienta

Ángulo de incidencia (a): Es el ángulo formado por la cara de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza ya mecanizada. Su origen se hace coincidir con la superficie mecanizada de la pieza y el sentido positivo es el antihorario.

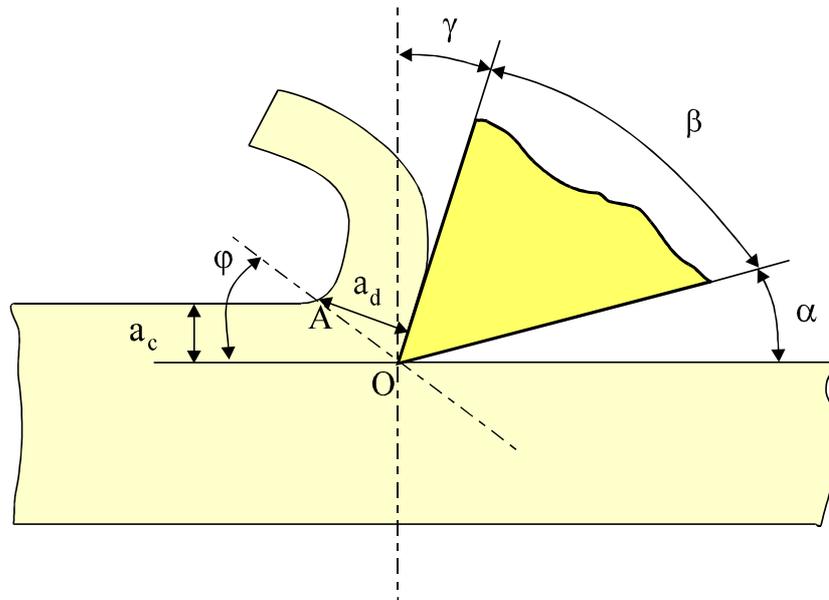


Figura 13.- Sección normal a la arista de corte

El ángulo de incidencia toma valores positivos comprendidos normalmente entre 5° y 10° . Interesa que sea lo menor posible, sin embargo, en valores muy pequeños de a , se produce un excesivo rozamiento entre la herramienta y la pieza, generando un incremento de temperatura que puede afectar a las propiedades mecánicas y geométricas de ambas.

Ángulo de desprendimiento (γ): Es el ángulo formado por la cara de desprendimiento de la herramienta y la dirección perpendicular a la superficie mecanizada. Su origen se hace coincidir con dicha dirección normal, siendo su sentido positivo horario para la representación indicada en la figura 13.

El ángulo de desprendimiento toma valores entre -5° y 30° . Valores positivos de este ángulo reducen el rozamiento entre la viruta y la herramienta, sin embargo, a igualdad de ángulo de incidencia, obligan a emplear herramientas menos robustas (menor ángulo de filo), que presentan mayor facilidad de rotura y menores posibilidades de evacuación de calor. Por contra, el empleo de ángulos de desprendimiento negativos, incrementa el rozamiento viruta-herramienta y produce un incremento del consumo de potencia al requerirse una mayor energía de deformación de la viruta que en el caso de γ positivo. No obstante, suele emplearse este tipo de geometría cuando se requiere una herramienta con mayor ángulo de filo.

Según el signo del ángulo de desprendimiento se diferencia entre **geometría de corte positiva** o **negativa** tal y como se muestra en la figura 14.

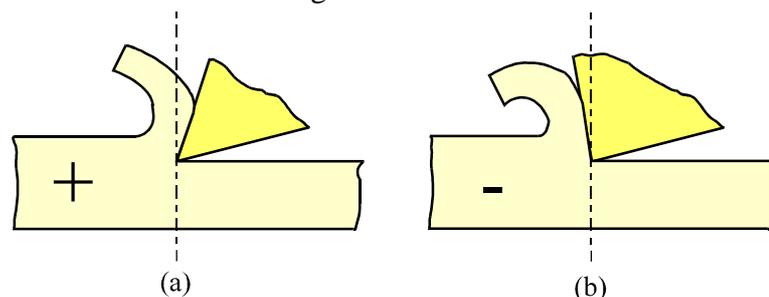


Figura 14.- Geometrías de corte positiva (a) y negativa (b)

Como relación geométrica entre los ángulos definidos se cumple que

$$a + b + g = 90^\circ$$

Plano de deslizamiento: Es un plano teórico en el que se produce la deformación del material de la pieza. En rigor se trata de una zona de deslizamiento más que de un plano propiamente dicho, sin embargo en la práctica es frecuente reducir esta zona a un plano.

Ángulo de deslizamiento (j): Es el ángulo formado por la superficie de la pieza y el plano de deslizamiento.

Espesor de viruta indeformada (a_c): es el espesor del material que va a ser eliminado antes de sufrir deformación alguna.

Espesor de viruta deformada (a_d): es el espesor del material eliminado después de haber sufrido la deformación.

Factor de recalado (z): es el cociente entre los espesores de viruta deformada y sin deformar. Es siempre mayor o igual que la unidad.

$$z = \frac{a_d}{a_c}$$

Si se observa la figura 13, puede apreciarse que si A es el punto que define el ángulo de deslizamiento, se tiene:

$$a_c = \overline{OA} \operatorname{sen} j$$

$$a_d = \overline{OA} \cos(j - g)$$

y por tanto

$$z = \frac{a_d}{a_c} = \frac{\cos(j - g)}{\operatorname{sen} j} \quad \operatorname{tg} j = \frac{\cos g}{z - \operatorname{sen} g}$$

expresiones que relacionan los ángulos de deslizamiento (φ) y de desprendimiento (γ) a través del factor de recalado (ζ).

Sección normal a la velocidad de corte

En una sección normal a la velocidad de corte se tienen los siguientes parámetros mostrados en la figura 15.

Ancho de corte (b): es la longitud de la arista de corte que efectivamente elimina material

Sección de viruta indeformada (A_c): Es la sección de material perpendicular a la dirección de la velocidad de corte que va a ser eliminada. Se cumple que

$$A_c = b a_c$$

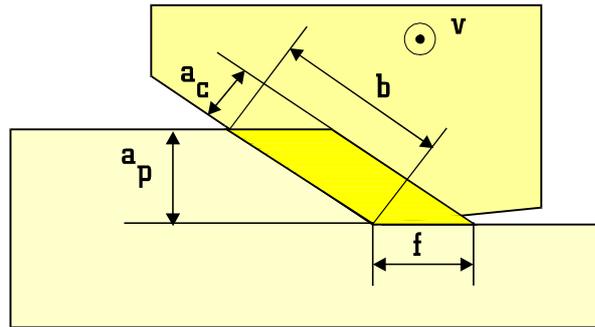


Figura 15.- Sección normal a la velocidad de corte.

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo (\dot{z}):

$$\dot{z} = A_c v = b a_c v$$

El factor de escala mostrado en la figura 15 no se corresponde con la realidad, ya que, por lo general, la pieza suele tener unas dimensiones considerablemente mayores que las de la sección de viruta y el ancho de corte. No obstante, considerando una situación tal y como la indicada en la figura 15, en la que la pieza va siendo mecanizada en sucesivas pasadas distanciadas entre sí una longitud f , se tiene:

Avance (f): Desplazamiento de la herramienta entre dos pasadas consecutivas

Profundidad de pasada (a_p): Distancia de penetración de la herramienta medida en perpendicular respecto a la superficie libre de la pieza.

Ángulo de posición (α_r): es el ángulo formado por la arista de corte y la dirección de la velocidad de avance

Se cumple que

$$A_c = b a_c = f a_p$$

Otros parámetros no geométricos, asociados al proceso de corte son:

Tiempo de mecanizado (t_m): es aquel tiempo durante el cual se produce el desplazamiento relativo entre pieza y herramienta.

Tiempo de corte (t_c): es el tiempo durante el cual se produce eliminación de material. Este tiempo es menor o igual que el tiempo de mecanizado

Fuerza de corte (F_c): Es el valor de la fuerza necesaria para eliminar el material de la pieza en la dirección de la velocidad de corte.

Potencia de corte (\dot{W}): es la energía necesaria por unidad de tiempo para eliminar el material de la pieza

ROZAMIENTO Y TEMPERATURA

Debido a los elevados valores de los esfuerzos involucrados en el proceso de corte, se producen asimismo valores elevados en la fuerza de rozamiento, que suponen un incremento considerable de la temperatura de la herramienta y de la pieza en la zona de corte. Esta elevación de la temperatura trae consigo, entre otras posibles consecuencias, la disminución de los valores de dureza y resistencia al desgaste de la herramienta y variaciones dimensionales de ésta por dilataciones térmicas.

Por todo ello, resulta de vital importancia en los procesos de mecanizado facilitar al máximo la evacuación del calor generado por las fuerzas de rozamiento, a fin de minimizar los efectos negativos que éste genera.

El modelo de rozamiento normalmente aplicado en el mecanizado convencional es el de rozamiento de semiadherencia, ya que el modelo de rozamiento de Coulomb empleado en mecánica clásica $F_r = \mu N$, no resulta aplicable debido a que la componente normal a la superficie presenta valores muy superiores a los admitidos por este modelo.

Así, la fuerza de rozamiento es proporcional a la tensión de fluencia a cortadura del material de la pieza (**K**) y a la sección de contacto entre pieza y herramienta, siendo el coeficiente de proporcionalidad el denominado **factor de rozamiento de semiadherencia (m)**

$$F_r = m K \text{ Área.}$$

Por su parte, el incremento de temperatura debido al rozamiento, resulta más crítico en la herramienta que en la pieza. La razón es que la pieza presenta en general unas dimensiones mayores que permiten la evacuación del calor por conducción hacia el interior y por convección hacia el exterior de la misma y que sólo una pequeña parte de la superficie de mecanizado se ve afectada en cada instante por el proceso. En el caso de la herramienta la situación es la inversa, es decir, sufre continuamente el efecto del rozamiento durante el proceso de corte y no dispone de las mismas posibilidades de evacuación del calor generado.

En una sección normal, se localizan tres zonas en las que se alcanza un mayor incremento de temperatura tal y como muestra la figura 16.

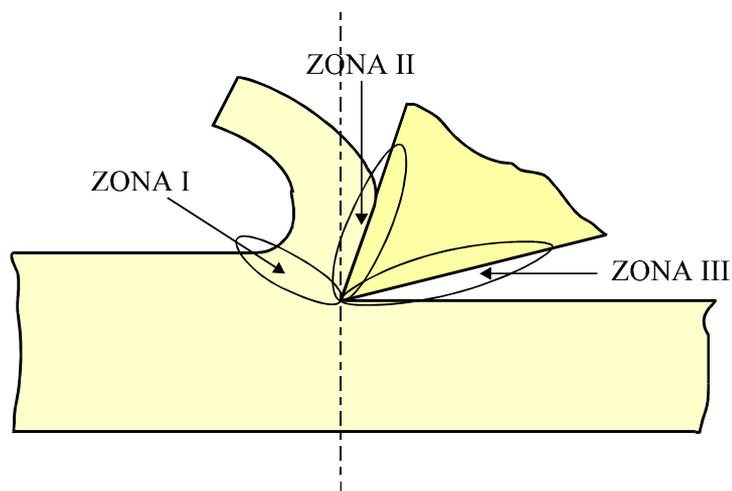


Figura 16.- Zonas de elevada temperatura en un proceso de mecanizado

La primera de ellas (zona I) engloba el plano o la zona de deslizamiento, que es aquella en la que se produce un rozamiento interno del material de la pieza que está siendo deformado. La segunda zona (zona II) se localiza en la cara de desprendimiento de la herramienta y aparece como consecuencia del rozamiento entre ésta y la viruta. En esta zona se detecta el punto de máxima temperatura, coincidiendo con el punto final de contacto viruta-herramienta. Finalmente aparece una tercera zona (zona III) en las inmediaciones de la cara de incidencia de la herramienta debida al rozamiento aparecido entre ésta y la superficie ya mecanizada de la pieza.

El calor generado en las zonas I y III afecta fundamentalmente a la pieza que, tal y como ha sido indicado, presenta mayores posibilidades de evacuación del mismo por conducción hacia el interior y por convección hacia el ambiente exterior. La zona más crítica es la zona II, puesto que, aunque el calor generado se distribuya entre la viruta y la herramienta, la parte correspondiente a la herramienta resulta más difícil de eliminar y va acumulándose a medida que se desarrolla el proceso.

Un efecto muy nocivo, derivado del incremento de temperatura, es el conocido como "filo recrecido" cuya aparición depende además de los materiales de pieza y herramienta. El filo recrecido consiste en la deposición progresiva de material de la pieza sobre la cara de desprendimiento de la herramienta. Este material queda adherido por soldadura y modifica la geometría de la herramienta, de forma tal que se hace necesario detener el proceso y proceder a la eliminación del recrecimiento antes de proseguir.

Para disminuir el incremento de temperatura de la herramienta durante el proceso de mecanizado se utilizan los denominados **fluidos de corte**. Estos actúan, bien mediante una disminución del coeficiente de rozamiento (lubricación), bien permitiendo una mayor posibilidad de evacuación del calor generado (refrigeración).

Ambos efectos, lubricación y refrigeración, suelen actuar simultáneamente. Según predomine uno u otro puede establecerse una subdivisión entre los fluidos de corte. Aquellos en los que predomina el efecto de lubricación están constituidos mayoritariamente por aceites minerales, y suelen emplearse en procesos con velocidades de corte relativamente bajas (escariado, brochado etc.). En los que predomina la refrigeración (taladrinas) su constitución mayoritaria es agua con la adición de aceites minerales solubles, bien disueltos o bien en emulsión.

CALCULO DE FUERZAS DE CORTE

La determinación de la fuerza de corte en el mecanizado permite conocer, no sólo las sollicitaciones dinámicas a las que se ve sometida la herramienta o la pieza, sino también el valor de la potencia requerida para poder efectuar el proceso. La mayor parte de dicha potencia se consume en la eliminación del material de la pieza, de ahí que la componente de la fuerza que reviste una mayor importancia desde este punto de vista es aquélla que tiene la misma dirección que la velocidad resultante de corte.

A esta componente es a la que normalmente se denomina fuerza de corte (F_c) y es el objeto de cálculo de los métodos que a continuación se exponen.

Existen fundamentalmente dos grupos de métodos para determinar los valores de la fuerza de corte en el mecanizado. El primero de los grupos se basa en una determinación empírica de la misma mediante la realización de un cierto número de ensayos en diferentes condiciones de trabajo y la extrapolación de los resultados obtenidos a expresiones matemáticas de mayor o menor complejidad acorde con el modelo elegido. El segundo grupo se basa en la obtención de fórmulas basadas en los modelos tradicionales de estudio del proceso de corte como son el modelo de corte oblicuo y su versión más simplificada de corte ortogonal.

A continuación se presentan dos métodos, cada uno de ellos pertenecientes a uno de los grupos anteriormente mencionados.

Método de la presión de corte

Este método es de los denominados empíricos. Establece que la fuerza de corte es directamente proporcional a la sección de viruta indeformada con una constante de proporcionalidad denominada presión de corte (k_s).

$$F_c = k_s A_c$$

La presión de corte depende de numerosos factores, entre los cuales cabe citar:

- a) **Material** de la pieza y de la herramienta. Ambos materiales, aparte de otros factores (acabado superficial, lubricación, etc.), son responsables del valor del rozamiento que aparece entre ambos cuando se ponen en contacto. A medida que dicho rozamiento se incrementa también se incrementa el valor de k_s . Asimismo, un incremento de la dureza del material de la pieza supone un aumento en el valor de k_s .
- b) **Geometría** de la herramienta y de la pieza. En particular existe una variación de k_s con la variación del ángulo de desprendimiento. Cuanto más "positiva" es la geometría de corte (mayor ángulo de desprendimiento), menor es el valor de k_s puesto que la viruta sufre una menor deformación a igualdad de material eliminado.
- c) **Sección de viruta**. Cuando la sección de viruta aumenta k_s disminuye
- d) **Velocidad de corte**. Aunque de un modo muy ligero, se observa una disminución de la presión de corte cuando aumenta la velocidad de corte.

e) **Lubricación.** Al modificarse las condiciones de rozamiento pieza/herramienta, un incremento de la lubricación supone un descenso del valor de k_s al reducirse la fuerza de rozamiento.

f) **Desgaste** de herramienta. Modifica la geometría y por tanto el valor de k_s .

Al ser tan numerosos, y en algunos casos tan difícilmente cuantificables los factores que influyen en el valor de k_s , el único método fiable para su determinación es la medición directa sobre el proceso de mecanizado concreto en las condiciones específicas en las que éste se realiza. En la práctica, dado que este proceder resulta poco viable, se recurre a la utilización de tablas que recogen las variaciones de k_s en función de una serie de variables dependientes de los factores anteriormente mencionados.

Un primer método empírico para la determinación de la presión de corte establece que k_s puede obtenerse a partir de

$$k_s = \frac{C_{ks}}{E_{ks} \sqrt{A_c}}$$

donde C_{ks} y E_{ks} son constantes que dependen de los materiales de la pieza y herramienta y que pueden encontrarse en forma de tablas. Este método, aunque sencillo en su aplicación, no suele proporcionar valores excesivamente fiables, por lo que su aplicación queda reducida para obtener una primera aproximación del valor de k_s

Un segundo método, también sencillo, aunque algo más completo, se basa en correlacionar el valor de k_s con el espesor de viruta indeformada a_c . Para ello se parte de la presión específica de corte k_{s0} que se corresponde con el valor de k_s cuando la sección de viruta A_c es la unidad. Experimentalmente, el valor de la fuerza de corte F_c a partir de k_{s0} puede establecerse mediante una relación de la forma

$$F_c = k_{s0} b^y a_c^x$$

donde b representa el ancho de corte, a_c representa el espesor de viruta indeformada, y x e y son exponentes menores que la unidad dependientes del material de la pieza.

Relacionando esta expresión con la ya citada

$$F_c = k_s A_c$$

se llega a

$$k_s = k_{s0} b^{y-1} a_c^{x-1}$$

Valores experimentales obtenidos en distintos ensayos sobre diversos materiales demuestran que en la práctica puede aproximarse el valor del exponente y a la unidad, por lo que llamando $z=1-x$, se tiene

$$k_s = k_{s0} a_c^{-z}$$

Teniendo en cuenta que $a_c = f \operatorname{sen} k_r$, la expresión final de la fuerza de corte queda como

$$F_c = k_s A_c = k_{s0} a_c^{1-z} b = k_{s0} f^{1-z} (\operatorname{sen} k_r)^{-z} a_p$$

En la siguiente tabla se recogen los valores de k_{s0} y de z para materiales de uso más frecuente.

MATERIAL	AMERICANA A.A.	UNE	k_{s0} daN/mm ²	z
Aleaciones de Aluminio	1100	L-3002	23	0.3
	2011	L-3192	34	0.3
	2014	L-3130	87	0.3
	2017	L-3120	80	0.3
	2024	L-3140	76	0.3
	4032	L-3541	76	0.3
	6061	L-3420	59	0.3
	7075	L-3710	100	0.3

MATERIAL	Resistencia a tracción/Dureza HB	k_{s0} daN/mm ²	z
Acero al carbono	<50 daN/mm ²	155	0.2
Acero al carbono	50/70 daN/mm ²	171	0.2
Acero al carbono	70/100 daN/mm ²	186	0.2
Acero colado	<50 daN/mm ²	136	0.2
Acero colado	50/65 daN/mm ²	148	0.2
Acero colado	>65 daN/mm ²	163	0.2
Acero aleado	70/85 daN/mm ²	171	0.2
Acero aleado	85/100 daN/mm ²	186	0.2
Acero aleado	100/140 daN/mm ²	202	0.2
Acero aleado	140/180 daN/mm ²	225	0.2
Acero inoxidable austenítico		179	0.2
Acero inoxidable ferrítico-martensítico		155	0.2
Fundición	<200 HB	97	0.2
Fundición	>200 HB	136	0.2
Fundición	<500 HB	210	0.2
blanca	>500 HB	233	0.2

MATERIAL	k_{s0} daN/mm ²	z
Cobre	78	0.3
Bronce	124	0.3
Latón	54	0.3
Plásticos	19	0.3

Valores de presión específica de corte k_{s0} para materiales de uso más frecuente

Teniendo en cuenta todo lo dicho, este procedimiento de cálculo se debe considerar sólo estimativo. Pese a ello los valores obtenidos sirven como una primera aproximación que permite establecer el orden de magnitud de las condiciones de corte.

Método de Corte Ortogonal

Este método se basa en la teoría de corte ortogonal, que supone un ángulo de inclinación (λ) de 90° . Para la aplicación del mismo se establecen además dos hipótesis simplificativas: (a) La línea de acción de las fuerzas de acción/reacción entre pieza y herramienta pasa por la arista de corte y (b) no existen momentos flectores

Con estas hipótesis se plantea la situación esquematizada en la figura 17, en la que R representa la resultante de las fuerzas que la herramienta ejerce sobre la pieza. Si la resultante R se descompone según la dirección del plano de deslizamiento y su normal aparecen las componentes F_s y N_s respectivamente. Análogamente, si la descomposición empleada es según la dirección de la velocidad de corte y su normal aparecen las componentes F_c y N_c . Los ángulos que caracterizan cada una de estas dos descomposiciones son ϕ (ángulo de deslizamiento) y ρ (ángulo de rozamiento) respectivamente.

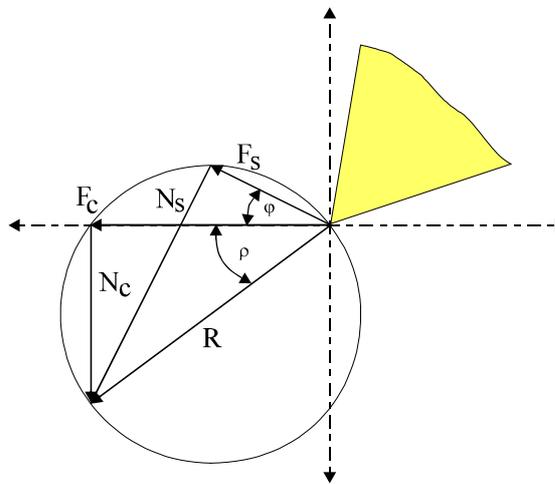


Figura 17.- Descomposición de la fuerza resultante de corte R

Se tienen por tanto las siguientes relaciones geométricas:

$$\begin{aligned} F_c &= R \cos r & F_s &= R \cos(j + r) \\ N_c &= R \sin r & N_s &= R \sin(j + r) \end{aligned}$$

A partir de estas expresiones puede determinarse

$$F_c = F_s \frac{\cos r}{\cos(j + r)}$$

Por otro lado y suponiendo una distribución de tensiones uniforme sobre el plano de deslizamiento de valor τ_s , tal y como la representada en la figura 18, se tiene que

$$F_s = t_s A_s = t_s b \frac{a_c}{\sin j} = \frac{t_s}{\sin j} A_c$$

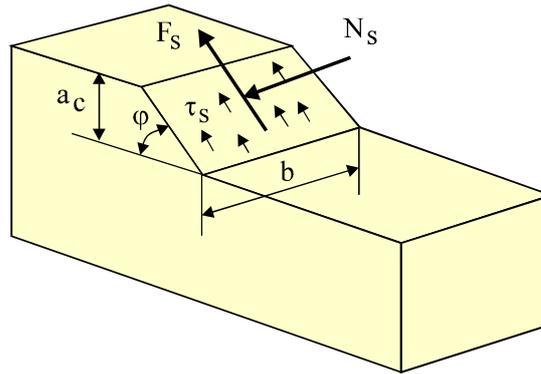


Figura 18.- Distribución de tensiones en el plano de deslizamiento.

t_s recibe el nombre de **tensión dinámica de deslizamiento**, siendo una constante propia de cada material. Sustituyendo la expresión anterior en la que relaciona F_c y F_s se llega a

$$F_c = \frac{t_s}{\operatorname{sen} j} \frac{\cos r}{\cos(j+r)} A_c$$

Esta expresión proporciona el valor de la fuerza de corte en función de la tensión dinámica de deslizamiento, de la sección de viruta indeformada, del ángulo de deslizamiento y del ángulo de rozamiento. De estas cuatro variables, tres de ellas t_s , ϕ y A_c son conocidas, mientras que ρ es desconocido. Por tanto se requiere una ecuación más que relacione el ángulo de rozamiento con las otras variables conocidas. Esta ecuación se obtiene a partir de la llamada "**hipótesis de Merchant**", que establece lo siguiente: "El plano de deslizamiento en un proceso de corte ortogonal, se sitúa de forma tal que la potencia necesaria para la deformación es mínima".

$$Pot = \dot{W} = F_c v = \frac{t_s}{\operatorname{sen} j} \frac{\cos r}{\cos(j+r)} A_c v$$

A partir de esta hipótesis se tiene que la potencia será mínima cuando el denominador sea máximo, es decir

$$\frac{d}{dj} [\operatorname{sen} j \cos(j+r)] = 0$$

esta condición implica que

$$j+r = \frac{p}{2} - j$$

que sustituida en la expresión de la fuerza de corte conduce a

$$F_c = 2t_s A_c \cot g j$$

Comparando esta expresión con la propuesta por el método de la presión de corte, puede observarse como existe una similitud entre ambas en el sentido de establecer una proporcionalidad entre la fuerza de corte (F_c) y la sección de viruta indeformada (A_c).

Si se tiene en cuenta que $F_c = k_s A_c$ y que $\cot g j = \frac{z - \operatorname{sen} g}{\cos g}$, la expresión final de la presión de corte determinada por el método de corte ortogonal queda como

$$k_s = 2t_s \frac{z - \operatorname{sen} g}{\cos g}$$

TORNEADO

Con el nombre genérico de **torneado** se conoce al conjunto de operaciones de mecanizado que pueden efectuarse en la máquina-herramienta denominada **torno**.

El torno fundamentalmente permite obtener piezas de revolución, aunque también es posible la obtención de superficies planas mediante ciertas operaciones. El movimiento principal en el torneado es de rotación y lo lleva la pieza, mientras que los movimientos de avance y penetración son generalmente rectilíneos y los lleva la herramienta. El eje de rotación de la pieza se designa como eje Z. El eje X se define paralelo a la bancada y perpendicular a Z, mientras que el eje Y, de escasa utilización en torneado, se define de forma tal que constituye un triedro rectángulo orientado a derechas con los ejes X y Z. En algunas máquinas y operaciones, el movimiento de avance puede no seguir una trayectoria rectilínea. Este es por ejemplo un caso típico de operaciones efectuadas en tornos de control numérico que permiten el control simultáneo de los ejes Z y X.

El trabajo en el torno, excepto cuando se emplean máquinas-herramienta de control numérico, requiere por lo general de una gran destreza por parte del operario que maneja la máquina, y de hecho la profesión de tornero es una de las más comunes y cotizadas en el campo de la formación profesional mecánica. Existen numerosos detalles operativos relacionados con las operaciones de torneado que no serán descritos. Ello es debido a que este documento no pretende sino proporcionar una ligera descripción de las operaciones más comunes y de su campo de aplicación, sin entrar en ese tipo de detalles, pudiendo encontrarse información acerca de éstos en la numerosa bibliografía de taller existente.

Aunque existen diversos tipos de tornos que incorporan ciertas particularidades, un torno puede ser esquematizado de la siguiente forma.

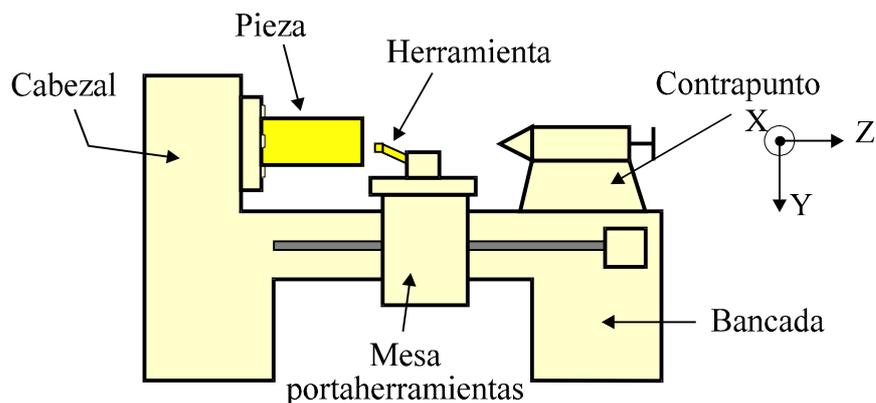


Figura 19.- Esquema de un torno paralelo.

El **motor de accionamiento**, situado en la parte inferior de la estructura, suministra la potencia requerida para el mecanizado. Dependiendo del tamaño y de las aplicaciones a las que se destine, el valor de la potencia puede oscilar desde 1 kW en las máquinas más pequeñas hasta 90 kW o incluso valores superiores en máquinas de mayor tamaño.

Del motor de accionamiento parte la cadena cinemática de transmisión (correas, engranajes, cajas de cambio, sistema hidráulico, etc.) que permite la transmisión de la potencia a los puntos en los que ésta se requiere.

El mayor consumo de potencia es requerido en el movimiento principal de rotación de la pieza. Esta rotación se realiza alrededor del eje principal o **husillo** de la máquina. Otro requerimiento de potencia, aunque de cuantía muy reducida en relación al anterior, procede del **carro o mesa portaherramientas** y es necesario para que la herramienta pueda realizar los desplazamientos de avance y de penetración.

Coaxial con el husillo se encuentra el **cabezal fijo** de la máquina, que normalmente incorpora el plato de garras como elemento estándar de sujeción. En el extremo opuesto se encuentra el **cabezal móvil o contrapunto** que se utiliza como elemento auxiliar de sujeción en piezas largas y como soporte de herramientas en ciertas operaciones.

Todos estos elementos son solidarios a una **bancada** que permite la fijación de la máquina-herramienta al suelo y proporciona rigidez estructural a cada uno de ellos.

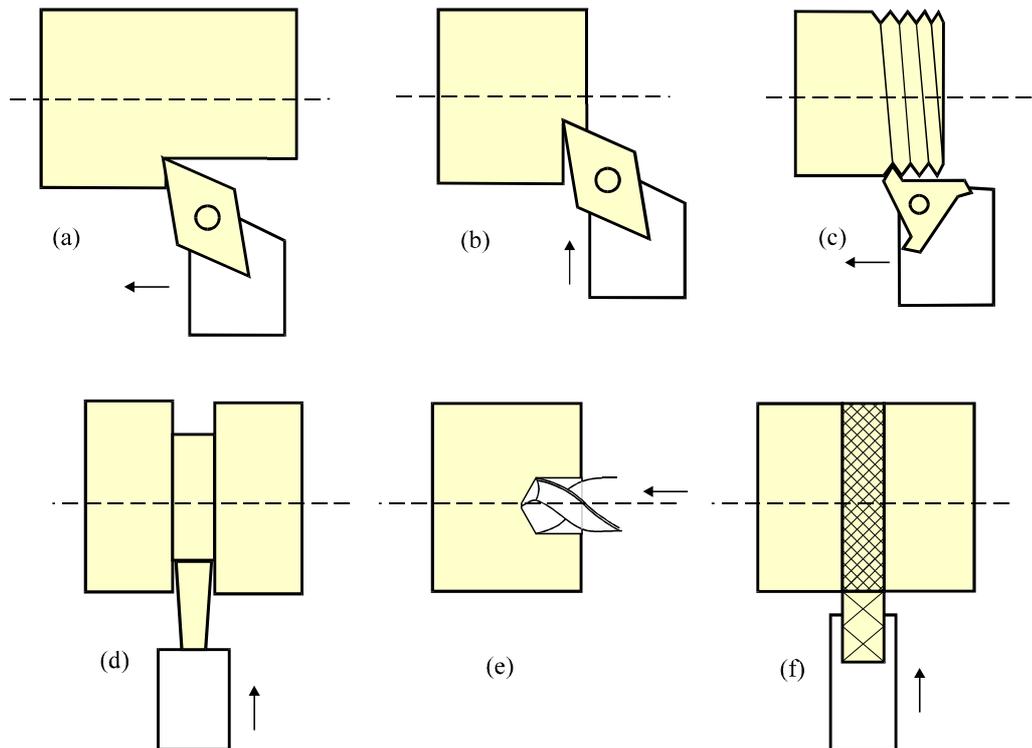


Figura 20.- Operaciones de torneado

Las operaciones más frecuentes a realizar en un torno, esquematizadas en la figura 20, son las siguientes:

Cilindrado (a). Permite la obtención de una geometría cilíndrica de revolución. Puede aplicarse tanto a exteriores como a interiores.

Refrentado (b). Permite la obtención de superficies planas perpendiculares al eje de rotación de la máquina.

Roscado (c). Permite la obtención de roscas, tornillos en el caso de roscado exterior y tuercas en el caso de roscado interior.

Cajeado o Ranurado (d). Permite la obtención de cajas o ranuras de revolución.

Tronzado (d). Permite cortar o tronzar la pieza perpendicularmente al eje de rotación de la pieza.

Taladrado (e). Permite la obtención de taladros coaxiales con el eje de rotación de la pieza.

Moleteado (f). Permite el marcado de la superficie cilíndrica de la pieza a fin de facilitar la rotación manual de la misma.

De todas estas operaciones, las dos primeras, cilindrado y refrentado, son las más importantes y las que aparecen con mayor frecuencia. A continuación se describen los parámetros y variables de corte asociados a cada una de las operaciones mencionadas.

Cilindrado

Tanto en su variante de exteriores como en la de interiores, la situación más frecuente en la operación de cilindrado es la de modificar (reducir en exteriores e incrementar en interiores) el diámetro de una pieza. El movimiento de avance de la herramienta es paralelo al eje Z.

En la figura 21, que representa una sección normal a la velocidad de corte (v) en una operación de cilindrado exterior, pueden apreciarse el avance (f), la profundidad de pasada (a_p), el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la sección de viruta indeformada (A_c), el ángulo de posición (k_r), la velocidad de corte (v), la velocidad de avance (v_f), la velocidad de rotación (N), el diámetro inicial (D_i) y el diámetro final (D_f).

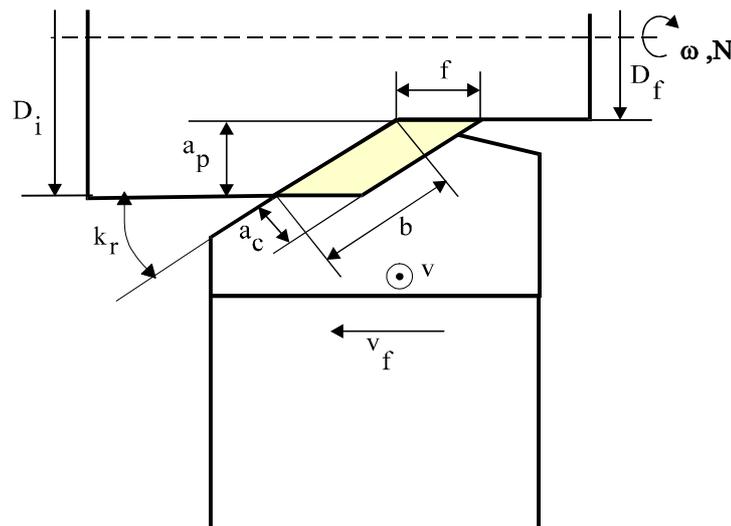


Figura 21.- Esquema de una operación de cilindrado exterior

Algunas expresiones que relacionan estos parámetros son:

Sección de viruta: $A_c = b a_c = f a_p$

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo: $\dot{z} = A_c v = f a_p v$

Velocidad de corte: $v = \frac{p ND}{1000}$

donde D está expresado en mm, N en rpm y v en m/min. Obsérvese que la velocidad de corte es variable entre los valores de los diámetros inicial y final. Por lo general, la diferencia entre estos dos diámetros suele ser pequeña en relación al valor de cualquiera de ambos, por lo que resulta práctica habitual considerar el diámetro inicial para calcular el valor de la velocidad de corte que se admite constante durante la operación.

Velocidad de avance: $v_f = fN$

donde f está expresado en mm/rev, N en rpm y v_f en mm/min.

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v = k_s \dot{z}$

Tiempo de mecanizado: Puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \frac{l_m}{v_f} = \frac{l_e + l + a_p \cotg k_r + l_s}{fN}$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y v_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la propia longitud a cilindrar (l) más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s) más la longitud necesaria para poder realizar el movimiento de penetración ($a_p \cotg k_r$).

Refrentado

La operación de refrentado permite la obtención de una superficie plana perpendicular al eje de rotación de la pieza. El movimiento de avance es, por tanto, transversal, es decir, perpendicular al eje Z y paralelo al eje X.

A diferencia del cilindrado, el refrentado, en el supuesto de realizarse a velocidad de rotación constante, no presenta una velocidad de corte constante, siendo ésta mayor a medida que la herramienta se aleja del eje de rotación. Por esta misma razón, en el refrentado tampoco es constante la potencia de corte, alcanzándose el valor máximo de ésta en el punto de contacto pieza-herramienta más alejado del eje de rotación. La figura 22 esquematiza un proceso de refrentado, en el que están representados el avance (f), la profundidad de pasada (a_p), el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la sección de viruta indeformada (A_c), el ángulo de posición (k_r), la velocidad de corte (v), la velocidad de avance (v_f), la velocidad de rotación (N), el diámetro interior (D_{int}) y el diámetro exterior (D_{ext}).

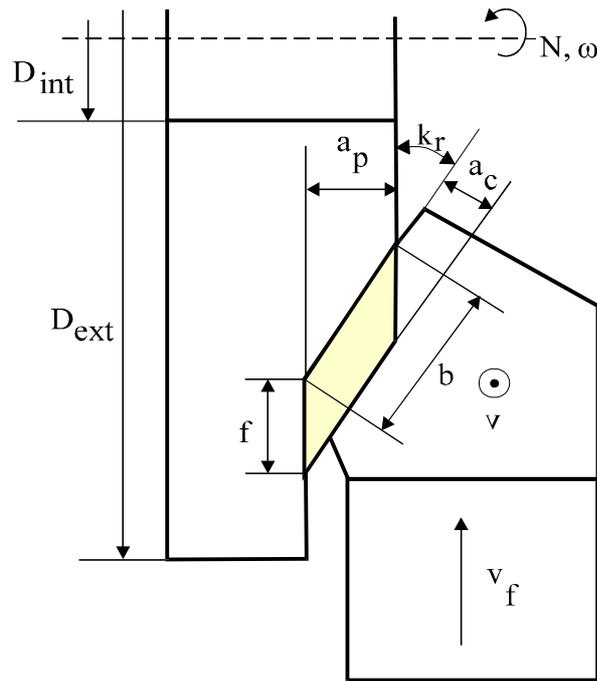


Figura 22.- Esquema de una operación de refrentado.

Algunas expresiones que relacionan estos parámetros son:

Sección de viruta: $A_c = b a_c = f a_p$

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo: $\dot{z} = A_c v = f a_p v$ (no constante)

Velocidad de corte: $v = \frac{p ND}{1000}$ donde D está expresado en mm, N en rpm y v en m/min.

Obsérvese como en esta operación, a diferencia del cilindrado, la velocidad de corte no es constante.

Velocidad de avance: $v_f = fN$, donde f está expresado en mm/rev, N en rpm y v_f en mm/min.

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v = k_s \dot{z}$ (no constante)

Tiempo de mecanizado: Puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \frac{l_m}{v_f} = \frac{l_e + \left(\frac{D_i - D_f}{2} \right) + a_p \cotg k_r + l_s}{fN}$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y v_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la longitud a refrentar en la pieza, más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s), más la longitud necesaria para poder realizar el movimiento de penetración ($a_p \cotg k_r$).

Roscado

La operación de roscado, tanto en interiores como exteriores, no es más que un caso particular de la operación de cilindrado en lo referente a su cinemática, variando respecto a aquella las condiciones de corte y la geometría de la herramienta.

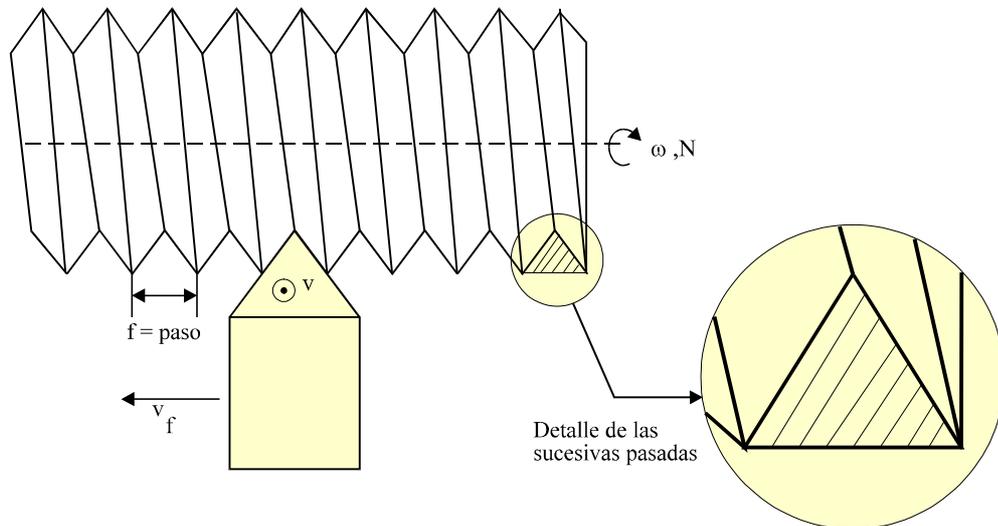


Figura 23.- Esquema de un proceso de roscado exterior.

La figura 23 esquematiza un proceso de roscado. Tal y como puede apreciarse, el avance de la herramienta se hace coincidir con el paso de la rosca. El número de pasadas a realizar, suele ser elevado si se compara con una operación de cilindrado equivalente, debido a la limitación del espesor de viruta indeformada en cada una de las pasadas, a fin de obtener una geometría aceptable en la rosca.

Cajeado o Ranurado

El cajeado puede considerarse como una variante del refrentado, aunque se realiza con una herramienta especial, unas condiciones de corte diferentes y en una posición de la generatriz que no está situada en el extremo de la pieza tal y como sucede en el refrentado. La figura 24 recoge un esquema de la operación de cajeado. La geometría más habitual del cajeado suele ser rectangular (situación mostrada en la figura), aunque mediante el empleo de herramientas con otras geometrías pueden obtenerse cajas de diferentes formas.

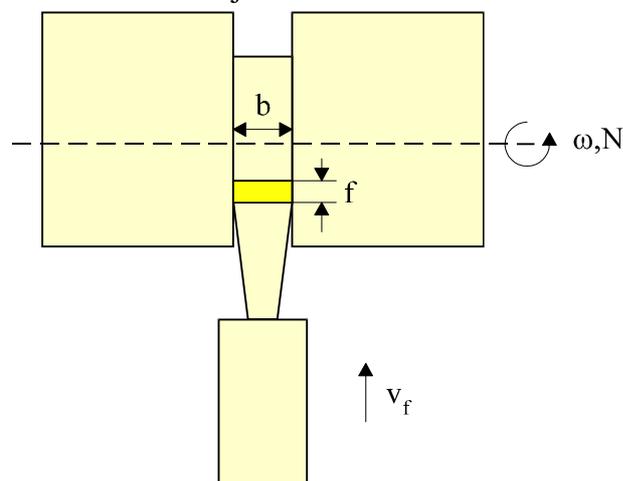


Figura 24.- Esquema de un proceso de cajeado.

Un caso particular de la operación de cajeado lo constituye el **tronzado**, que consiste en prolongar la profundidad de la caja hasta alcanzar el eje de rotación de la pieza, con el consiguiente corte de la pieza. El tronzado se emplea normalmente como operación final en el torneado de piezas en una sola fijación. Esta situación se da con frecuencia en operaciones semiautomatizadas en las cuales la alimentación del torno se realiza con una barra que sobresale por la parte exterior del cabezal fijo y que va siendo empujada una cierta distancia antes de iniciar el proceso de cada pieza.

Taladrado

Aunque no se trata de una operación específica del torno, y de hecho existen máquinas-herramienta específicas para taladrar, el torno permite la realización de taladros coaxiales al eje de rotación de la pieza. Para ello se sitúa una broca en el extremo del contrapunto y se desplaza éste con el movimiento de avance hasta conseguir el taladro. En el caso de tornos de control numérico, la broca suele situarse en la torreta portaherramientas en lugar de en el contrapunto, siendo su trabajo como la de cualquier otra herramienta de interiores. Una operación muy habitual en el torno, caso particular del taladrado, es la denominada operación de punteado. Consiste en dar un pequeño taladro cónico en el extremo de la pieza más alejado del plato de garras y permite utilizar este taladro como elemento de centraje en la sujeción entre puntos. Existen tornos, normalmente de control numérico, en los que la torreta dispone de un cabezal motorizado que permite la realización de taladros paralelos al eje del cabezal.

La cinemática del taladrado será estudiada dentro del grupo de operaciones a realizar en la taladradora.

Moleteado

El moleteado no es una operación de mecanizado propiamente dicha, puesto que no elimina material de la preforma. Se utiliza para marcar con una geometría estriada alguna de las superficies de revolución de la pieza, a fin de facilitar su amarre manual, impidiendo que ésta resbale en el contacto con la mano por efecto del sudor o la grasa depositada sobre la superficie. La figura 25 esquematiza un proceso de moleteado.

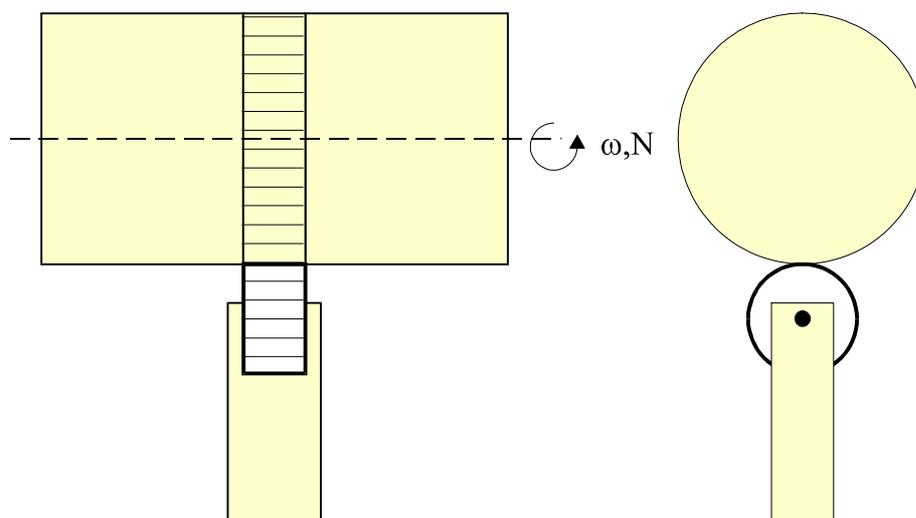


Figura 25.- Esquema de un proceso de moleteado.

LIMADO, CEPILLADO, MORTAJADO

Con el nombre **limado**, **cepillado** y **mortajado**, se conoce al conjunto de operaciones de mecanizado que pueden realizarse en las máquinas-herramienta denominadas **limadora**, **cepillo** y **mortajadora** respectivamente. Todas ellas, pese a ser efectuadas en diferentes máquinas-herramienta, se caracterizan porque el movimiento principal es de traslación y la herramienta empleada es monofil, obteniéndose por lo general superficies planas y ranuras paralelas a la dirección de dicho movimiento principal.

En el limado y en el cepillado el movimiento principal se realiza en un plano horizontal, mientras que en el mortajado dicho plano es vertical. El siguiente cuadro resume los movimientos de corte en cada uno de los tres tipos de máquinas mencionados.

M-H	M. Principal	M. Avance	M. Penetración
Limadora	Herramienta	Pieza	Herramienta
Cepillo	Pieza	Herramienta	Herramienta
Mortajadora	Herramienta	Pieza	Pieza

El movimiento de penetración, al tratarse de un movimiento previo al de eliminación de material, se obtiene de forma aproximada para la primera pasada mediante el posicionamiento relativo entre pieza y herramienta. Sin embargo, una vez realizada la fijación inicial de pieza y herramienta, los sucesivos movimientos de penetración, necesarios en el caso de varias pasadas, se obtienen mediante el desplazamiento del elemento que figura recogido en la tabla.

Los acabados superficiales y las tolerancias dimensionales obtenidos mediante este tipo de procedimientos, no son excesivamente buenos, de ahí que su uso más habitual sea el de operaciones de desbaste. Comparativamente con otros procesos de mecanizado tales como torneado o fresado, este grupo de procesos suele emplearse en un número mucho menor de trabajos. Se describe a continuación algunas de las características más sobresalientes de las tres máquinas-herramienta consideradas.

Limadora

Una limadora puede ser esquematizada de la siguiente forma.

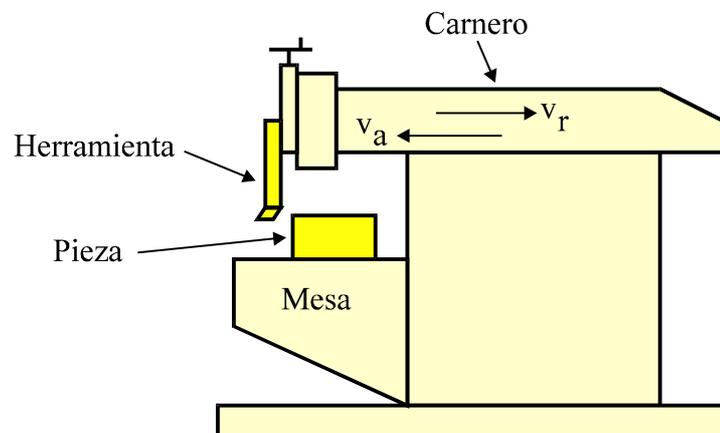


Figura 26.- Esquema de limadora.

El **motor de accionamiento** suministra la potencia requerida para el mecanizado, que se realiza gracias al movimiento alternativo del elemento superior de la máquina o **carnero**. Los valores de potencia oscilan entre 1 kW y 8 kW según las dimensiones de la máquina-herramienta. El movimiento alternativo de traslación se consigue mediante un **mecanismo de colisa**, esquematizado en la figura 27.

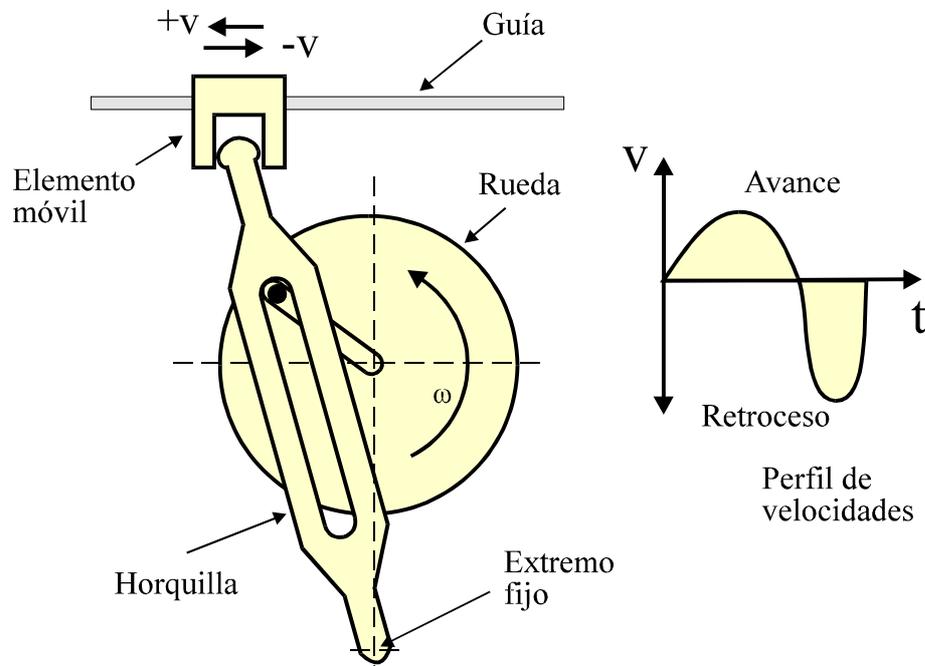


Figura 27.- Accionamiento de colisa y distribución de velocidades.

Este mecanismo conecta el motor de accionamiento a una rueda o volante que gira con una velocidad angular constante ω . A su vez esta rueda, mediante un saliente dispuesto al efecto, y regulable en distancia al eje de rotación de la rueda, obliga el movimiento en vaivén de una horquilla cerrada que tiene su extremo inferior anclado a un punto fijo, contenido en el mismo plano vertical que contiene el eje de rotación de la rueda. La horquilla va unida en su extremo superior a un elemento móvil en forma de U, que se desplaza, obligado por una guía, según una dirección contenida en un plano horizontal. Este elemento es solidario al carnero y le proporciona su movimiento de traslación en avance y retroceso.

El perfil de velocidades del elemento móvil y del carnero, se encuentra esquematizado en la figura 27. A partir de él puede observarse que la velocidad de corte v , no es constante, ya que comienza con valores iniciales nulos en los extremos de los recorridos del carnero, hasta alcanzar los valores máximos (diferentes en valor absoluto para cada recorrido) durante los recorridos de avance (+ v) y retroceso (- v). El valor máximo de la velocidad en el retroceso, es mayor que el valor máximo de la velocidad durante el avance. Asimismo el tiempo empleado en el retroceso es menor que el empleado durante el avance.

La herramienta, que es de tipo monofilo, y similar a la empleada en operaciones de torneado, se encuentra sujeta en el extremo delantero del carnero, pudiendo ser regulada su posición en altura a fin de poder efectuar el movimiento de penetración. La limadora cuenta con una mesa,

también regulable en altura, aunque no de forma precisa, sobre la que se sujeta la pieza. Esta mesa va dotada con un mecanismo de trinquete que posibilita el movimiento de avance.

La operación más habitual realizada en la limadora es la de planificado en desbaste de superficies planas. Para ello la herramienta recorre en sucesivas carreras de ida y vuelta de longitud L , toda la superficie de la pieza a mecanizar de anchura B , tal y como se esquematiza en la figura 28.

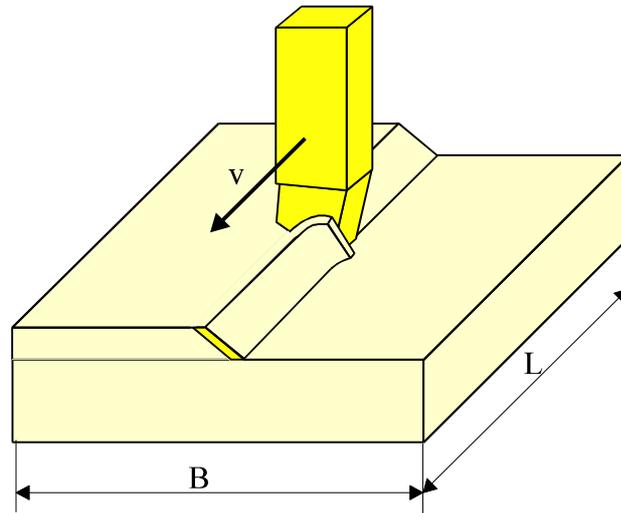


Figura 28.- Esquema de proceso de limado.

En el limado, los parámetros y variables de corte, así como las expresiones que los relacionan, son análogos a los definidos para las operaciones de torneado, con la salvedad de que la velocidad de corte es de traslación. En la figura 29 quedan representados el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la profundidad de pasada (a_p), el avance (f), la sección de viruta indeformada (A_c), el ángulo de posición (k_r), la velocidad de corte (v), la dirección de la velocidad de avance (v_f), y el ancho de la pieza (B).

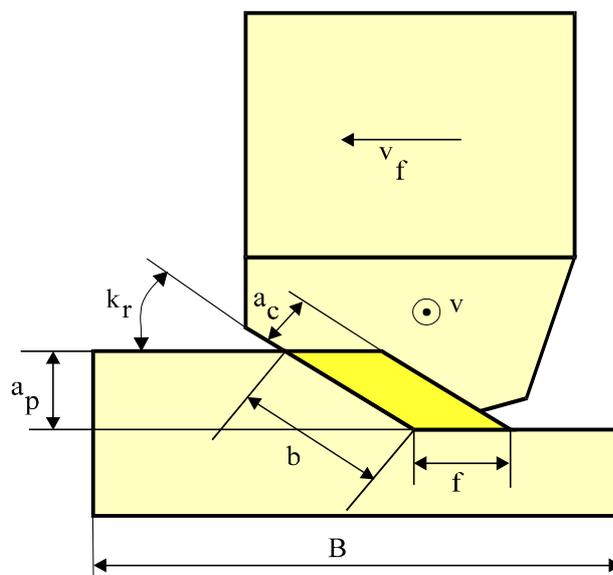


Figura 29.- Esquema de una operación de limado.

Algunas expresiones que relacionan entre estos parámetros son:

Sección de viruta: $A_c = b a_c = f a_p$

Velocidad de corte: En este caso, y debido al mecanismo de accionamiento, la velocidad de corte no es constante. En la práctica suele tomarse un valor medio para dicha velocidad en cada una de las dos carreras, avance y retroceso, considerándose constante a lo largo de las mismas. En la figura 30 se representan dichos valores medios como v_a y v_r .

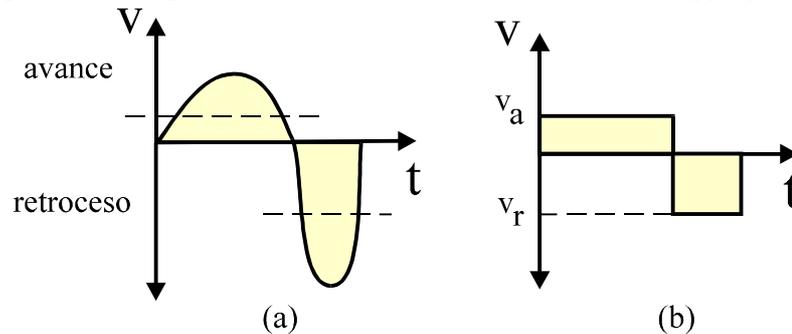


Figura 30.- Distribución de velocidades real (a) y aproximada (b).

Velocidad de avance: En este caso no es una velocidad continua ya que se produce intermitentemente entre cada carrera de ida y vuelta. No puede por tanto hablarse de una velocidad de avance propiamente dicha, aunque sí tiene sentido hablar de la dirección de la velocidad de avance.

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo: $\dot{z} = A_c v = f a_p v$

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v = k_s \dot{z}$

Tiempo de mecanizado: Puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \left[\frac{L}{v_a} + \frac{L}{v_r} \right] \frac{B}{f}$$

donde L representa la longitud de carrera, v_a y v_r son los valores medios de las velocidades de corte en el avance y el retroceso respectivamente, B es el ancho de la pieza y f es el avance.

Cepillo

Aunque con un aspecto muy diferente al de la limadora en cuanto a M-H se refiere, el cepillo realiza las mismas operaciones que las efectuadas en aquella, con la salvedad de un mayor tamaño admisible en las piezas a cepillar y un desplazamiento alternativo de la pieza en vez de la herramienta. Un cepillo consta de una base sobre la que apoya una mesa que se desplaza alternativamente. Ambas atraviesan un pórtico que sirve de soporte para un eje roscado sobre el que se desplaza la mesa portaherramientas con el movimiento de avance. La figura 31 esquematiza un cepillo.

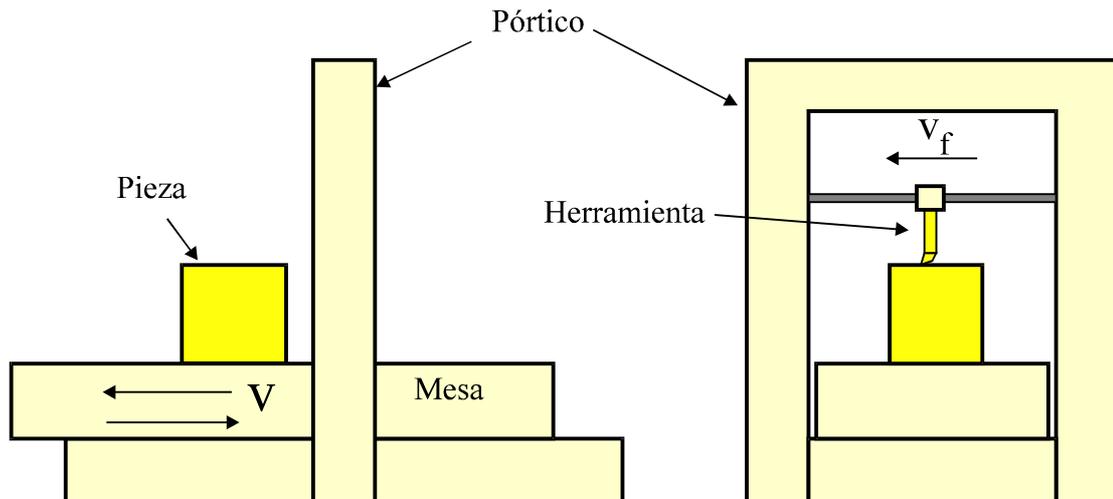


Figura 31.- Esquema de un cepillo.

El accionamiento de velocidades se realiza mediante una transmisión por engranajes, de ahí que ambas velocidades, en la carrera de avance y en la de retroceso, puedan ser consideradas constantes durante el proceso de cepillado.

Los parámetros y variables de corte asociadas al cepillado, así como las relaciones matemáticas establecidas entre ellos son los mismos que los ya definidos en el caso del limado.

Mortajadora

Todo lo indicado para la limadora resulta igualmente aplicable a la mortajadora, excepto que el plano en el que se produce el movimiento principal de corte es vertical. La figura 32 esquematiza una mortajadora.

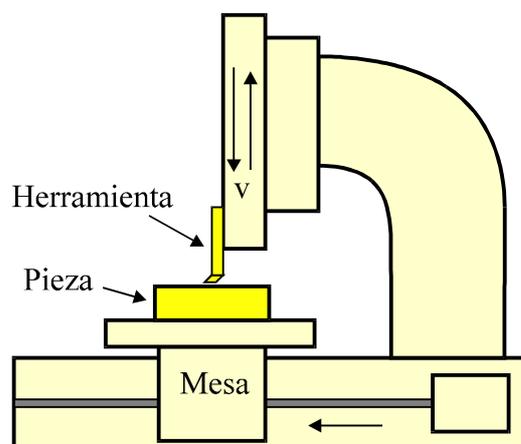


Figura 32.- Esquema de una mortajadora.

La disposición de la herramienta en la mortajadora, facilita el mecanizado de ranuras tanto exteriores como interiores.

BROCHADO

El término **brochado** reúne el conjunto de operaciones efectuadas en la máquina-herramienta denominada **brochadora**. Se trata de una máquina-herramienta con movimiento principal de traslación que, a diferencia de las otras máquinas-herramienta descritas, emplea una herramienta multifilo denominada **brocha**.

La figura 33 esquematiza una brocha de interiores. Tal y como puede apreciarse, la brocha presenta una serie de filos de sección creciente, cuya geometría es semejante a la de la forma final que se desea obtener. El brochado de interiores requiere, en primer lugar, de un taladrado previo en la pieza que permita al extremo inicial cilíndrico de la herramienta atravesar la pieza asomando por el extremo opuesto. Este extremo se sujeta al sistema de amarre de la brochadora que, mediante un esfuerzo de tracción, obliga al resto de la herramienta a atravesar la pieza. Cada uno de los filos arranca una pequeña sección de viruta, de forma tal que al completarse el corte de todos los filos de la brocha, queda en el interior de la pieza la geometría final buscada.

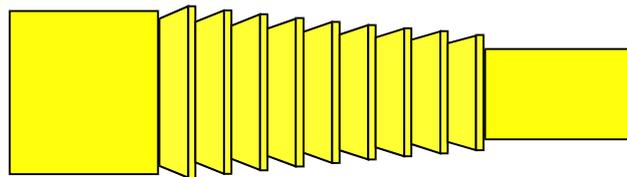


Figura 33.- Esquema de brocha

En el brochado de exteriores la operativa es similar, aunque no tiene porqué ser necesario un mecanizado previo antes del brochado propiamente dicho. La figura 34 recoge algunas geometrías de piezas propias de brochado.

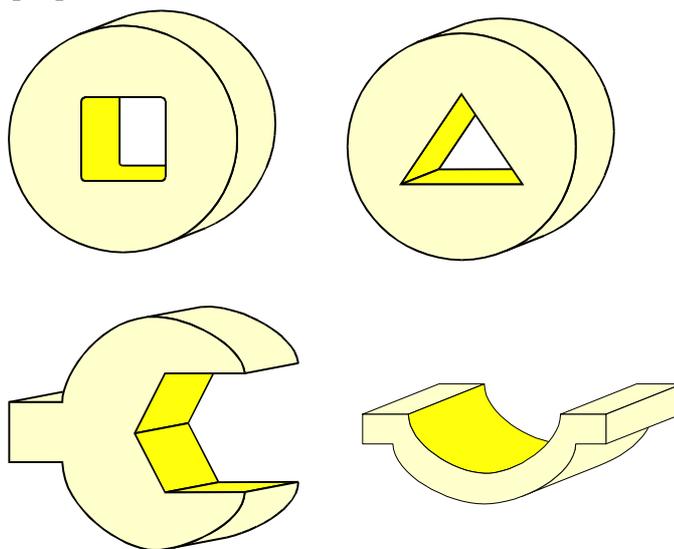


Figura 34.- Piezas brochadas en interiores

La velocidad de corte del brochado es, por lo general, menor que la de los restantes procesos de mecanizado descritos, y depende del diseño de la brocha además del material que esté siendo mecanizado. Es importante resaltar el hecho de que cada brocha puede ser empleada única y exclusivamente en la operación para la cual ha sido diseñada. Siendo una herramienta costosa de fabricar su uso se restringe para series largas o para operaciones en las que la geometría final no puede obtenerse mediante otros tipos de mecanizado convencional.

La figura 35 esquematiza una brochadora vertical de interiores. Existen también brochadoras horizontales aunque no son las más frecuentes por cuestiones de espacio.

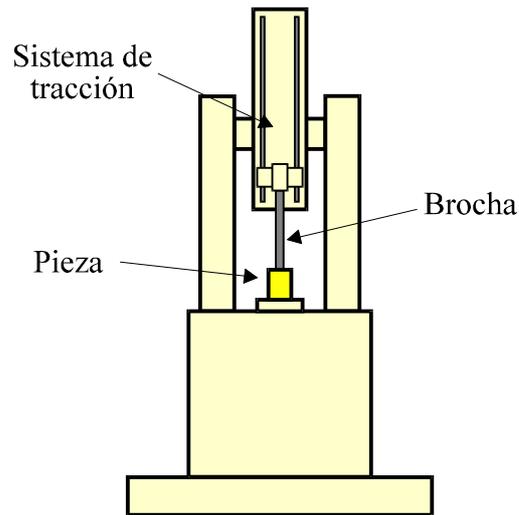


Figura 35.- Esquema de brochadora vertical de interiores.

TALADRADO

Con el nombre genérico de **taladrado** se conoce al conjunto de operaciones de mecanizado que pueden efectuarse en la máquina-herramienta denominada **taladradora**, aunque existen otras máquinas-herramienta tales como la fresadora, la mandrinadora ó el torno, en las que también se realizan operaciones análogas.

El taladrado permite realizar taladros u orificios en la pieza, paralelos al eje de rotación de la herramienta. Desde el punto de vista funcional, tan importante resulta la dimensión del taladro obtenido, como la posición relativa entre taladros en el caso de un taladrado múltiple.

El movimiento principal en el taladrado es de rotación, y lo lleva la herramienta. Los movimientos de avance y penetración son rectilíneos y coincidentes, y también los lleva la herramienta.

Aunque existen diversos tipos de taladradoras que incorporan ciertas particularidades, una taladradora puede ser esquematizada de la siguiente forma.

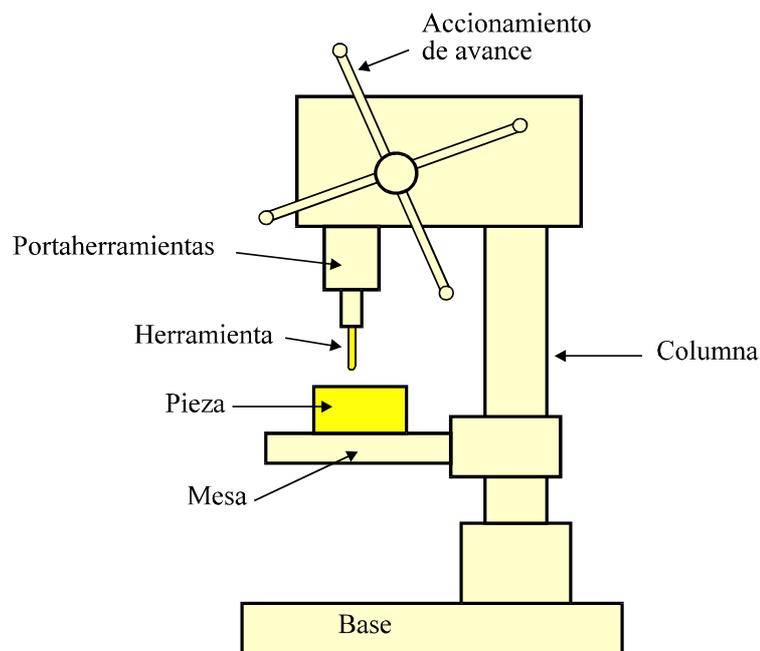


Figura 36.- Esquema de taladradora.

El **motor de accionamiento** suministra la potencia requerida para el mecanizado, cuyo valor puede oscilar desde 1 kW en las máquinas más pequeñas hasta 10 kW o incluso valores superiores en máquinas de mayor tamaño.

Del motor de accionamiento parte la cadena cinemática de transmisión (correas, engranajes, ruedas de fricción, etc.) que permite la transmisión de la potencia al movimiento principal de rotación de la herramienta. Esta rotación se realiza alrededor del eje principal o **husillo** de la máquina, que es vertical. La taladradora permite un desplazamiento manual y paralelo a dicho husillo, necesario para que la herramienta pueda realizar los desplazamientos de avance y de

penetración. La sujeción de la herramienta suele realizarse mediante un **portabrocas**, con un sistema de funcionamiento similar al plato de garras empleado en el torno, o bien directamente al husillo mediante conos ISO o Morse..

En el extremo opuesto al portabrocas, se encuentra la mesa de apoyo donde se sujeta la pieza que va ser taladrada. La posición de la mesa puede ser regulada en altura como una operación previa al taladrado propiamente dicho, permitiéndose de esta forma el trabajo con diferentes tamaños de pieza.

Todos estos elementos son solidarios a una **bancada** que permite la fijación de la máquina-herramienta al suelo y proporciona rigidez estructural a cada uno de ellos.

Operaciones de taladrado

Tal y como se ha indicado, la operación más frecuente en la taladradora es la realización de taladros en la pieza paralelos al eje de rotación de la herramienta. Esta operación presenta diversas variantes, que dependen de la funcionalidad requerida al taladro. Se describen a continuación las operaciones de taladrado más comunes.

Taladrado con broca: Permite la obtención de un taladro (pasante ó ciego) paralelo al eje de rotación de la pieza. Las tolerancias dimensionales obtenidas mediante esta operación no son muy buenas, por lo que sólo resulta aplicable en ciertas situaciones o bien como operación previa a otras operaciones de acabado. Cuando las dimensiones del taladro lo aconsejan, es práctica habitual emplear una secuencia de brocas de diámetros crecientes hasta alcanzar la dimensión final requerida.

Avellanado. Permite la variación de la forma en la parte inicial de los taladros. Las formas más comunes son la cónica y la cilíndrica tal y como se representa en la figura 37. Estos taladros se emplean normalmente para embutir las cabezas de los tornillos en el interior de las piezas, de forma tal que no sobresalgan en la superficie de la pieza. Su realización también se efectúa para facilitar el acoplamiento de piezas macho o para la eliminación de rebabas.

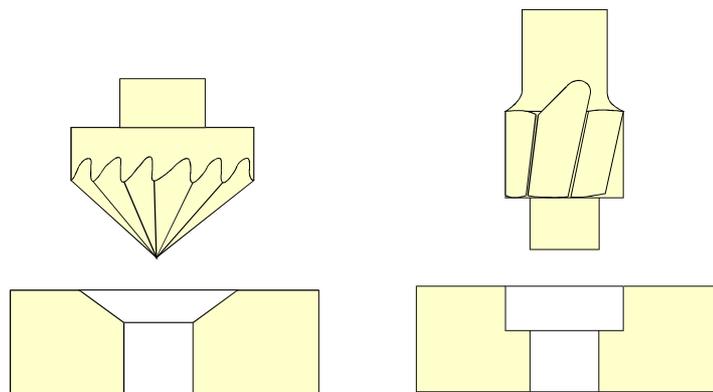


Figura 37.- Esquema de procesos de avellanado.

Escariado. Permite la obtención de tolerancias dimensionales estrechas en taladros de diámetros reducidos (hasta 20 mm de diámetro aproximadamente). El escariado requiere

una operación previa de taladrado con broca a una dimensión de taladro ligeramente inferior del nominal, para posteriormente, mediante la acción de la herramienta o escariador, repasar la geometría del taladro hasta dejarlo dentro de tolerancias.

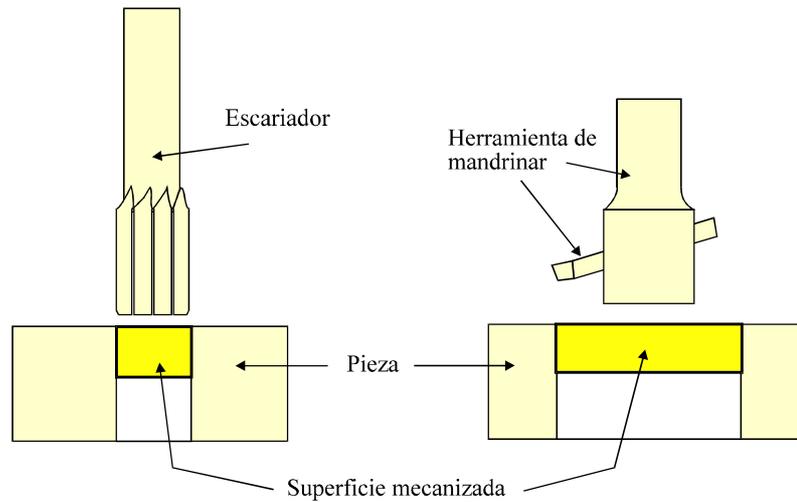


Figura 38.- Esquema de un proceso de escariado y de mandrinado.

Mandrinado. De forma análoga al escariado, permite la obtención de tolerancias dimensionales estrechas en taladros de diámetros de dimensiones por encima de los 20 mm en diámetro. El mandrinado requiere igualmente una operación previa de taladrado del agujero a un diámetro de taladro ligeramente inferior al del nominal, para posteriormente repasar la geometría del taladro hasta dejarlo dentro de tolerancias. También se utiliza para la realización de taladros de grandes dimensiones.

Roscado con macho. Se trata de una operación que permite roscar taladros cuyo eje sea paralelo al husillo de la máquina-herramienta. La operación requiere de un taladrado previo con broca de un diámetro ligeramente inferior al del taladro roscado. Posteriormente este taladro es repasado con un macho de roscar, que elimina el material sobrante hasta conseguir la geometría final de la rosca. El macho de roscar tiene una geometría semejante a la del tornillo que se empleará en la unión roscada. Esta operación resulta delicada, en especial en diámetros menores de 5 mm, por lo que suele ser práctica habitual en estos casos su realización manual. Cuando se trabaja manualmente se emplean varios machos de geometrías semejantes, normalmente tres, que van configurando en sus respectivas pasadas la geometría final de la rosca.

Todas estas operaciones, pueden ser realizadas de manera análoga en la fresadora vertical, que será descrita más adelante. A continuación se describen los parámetros y variables de corte asociados a la operación de taladrado con broca.

Taladrado con broca

La geometría más común de la operación de taladrado con broca es la recogida en la figura 39. A diferencia de otras operaciones de mecanizado descritas anteriormente, en las que se empleaban herramientas monofilo, la herramienta empleada en el taladrado (broca), es una herramienta multifilo. Sin embargo, se da la circunstancia de que todos los filos de la

herramienta trabajan simultáneamente, pudiendo analizarse el comportamiento de un único filo y extrapolar los resultados obtenidos a todos los que integran la herramienta.

De esta forma, llamando n_f al número de fillos de la herramienta y f al avance por vuelta de la herramienta, puede definirse el avance por filo f_z como el cociente $f_z = \frac{f}{n_f}$

El avance por filo representa la distancia que avanza un filo de la herramienta en la dirección perpendicular a la superficie de la pieza a lo largo de una vuelta o revolución de la herramienta. Sus unidades son, por tanto, [mm/rev/filo].

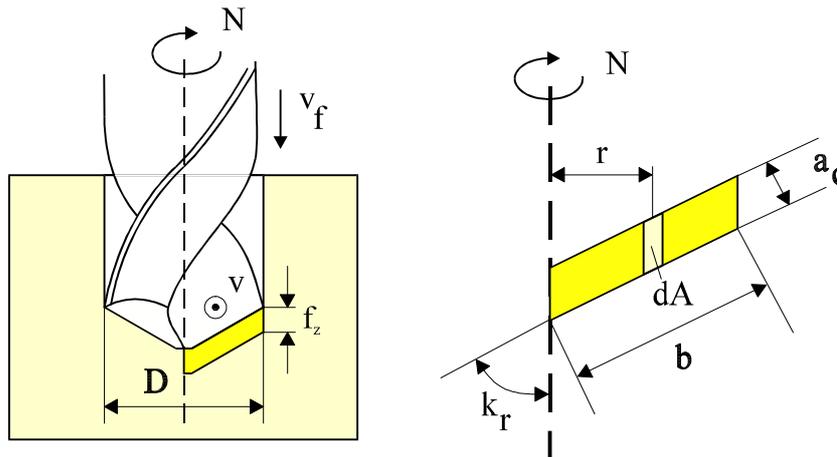


Figura 39.- Esquema de una operación de taladrado

En la figura 39 quedan representados, para un filo, el avance por filo (f_z), el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la sección de viruta indeformada (A_c), el ángulo de posición (k_r), la velocidad de corte (v), la velocidad de avance (v_f), la velocidad de rotación (N), y el diámetro del taladro (D).

Algunas expresiones que relacionan estos parámetros son:

Sección de viruta:

$$A_c = b a_c n_f = f_z \frac{D}{2} n_f = f \frac{D}{2}$$

Velocidad de corte: $v = \frac{pNd}{1000}$ (para un diámetro d comprendido entre 0 y D).

donde d está expresado en mm, N en r.p.m. y v en m/min. Obsérvese que esta velocidad no es constante puesto que depende de la distancia del punto considerado hasta el eje de rotación de la herramienta.

Velocidad de avance: $v_f = fN$

donde f está expresado en mm/rev, N en r.p.m. y v_f en mm/min.

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo:

$$\dot{z} = Area \times v_f = p \frac{D^2}{4} \times f N$$

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v = k_s \dot{z}$

Tiempo de mecanizado: Puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \frac{l_m}{v_f} = \frac{l_e + l + \frac{D}{2} \cotg k_r + l_s}{fN}$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y v_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la propia longitud a taladrar (l), más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s), más la longitud de la punta de la herramienta ($D/2 \cotg k_r$).

FRESADO

Con el nombre genérico de **fresado** se conoce al conjunto de operaciones de mecanizado que pueden efectuarse en la máquina-herramienta denominada **fresadora**. El fresado permite mecanizar superficies planas, ranuras, engranajes e incluso superficies curvas o alabeadas. Constituye, junto con el torneado, el grupo de operaciones mayoritariamente empleadas en el mecanizado.

El movimiento principal en el fresado es de rotación, y lo lleva la herramienta o fresa. Los movimientos de avance y penetración son generalmente rectilíneos, pudiendo llevarlos la herramienta o la pieza según el tipo de máquina-herramienta y la operación realizada.

Aunque existen diversos tipos de fresadoras que incorporan ciertas particularidades, una fresadora puede ser esquematizada como uno de los dos tipos mostrados en la figura 40.

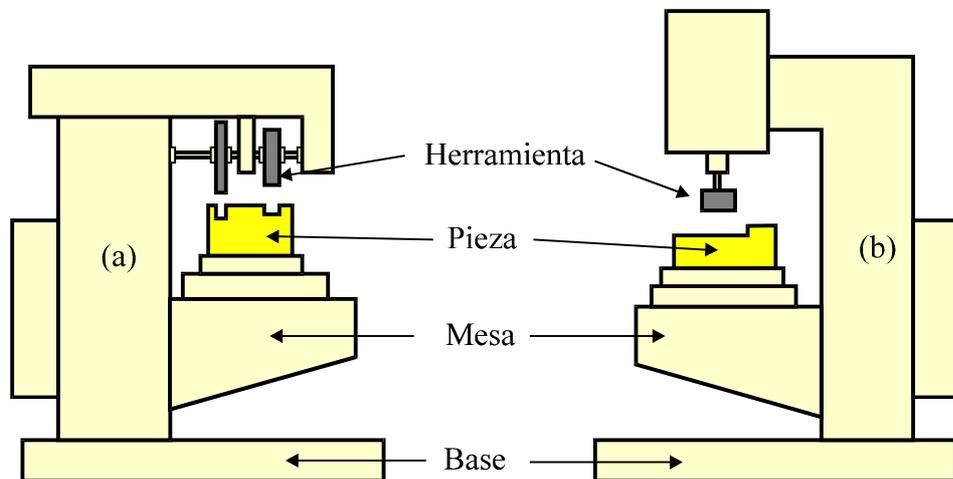


Figura 40.- Esquema de fresadora horizontal (a), y vertical (b).

El **motor de accionamiento** suministra la potencia requerida para el mecanizado, cuyo valor puede oscilar desde 1 kW en las máquinas más pequeñas hasta 10 kW o incluso valores superiores en máquinas de mayor tamaño.

Del motor de accionamiento parte la cadena cinemática de transmisión (correas, engranajes, ruedas de fricción, etc.) que permite la transmisión de la potencia al **cabezal** de la máquina-herramienta donde se genera el movimiento principal de rotación de la herramienta. Esta rotación se realiza alrededor del eje principal o **husillo** de la máquina, designado como eje Z. El eje X es horizontal y por tanto paralelo a la superficie de apoyo de la pieza, y el eje Y es perpendicular a los otros dos formando un triedro a derechas. La fresadora permite un desplazamiento relativo entre pieza y herramienta, paralelo al husillo, además de los desplazamientos contenidos en un plano perpendicular a dicho husillo. La sujeción de la herramienta a la máquina suele realizarse mediante un eje **portafresas**. Este eje posee un extremo cónico (cono ISO, cono Morse) que se acopla al husillo de la fresadora, y al que se unen las fresas empleando para ello medios de fijación estandarizados (pinzas, chavetas, etc.).

En el extremo opuesto al cono del eje portafresas en fresadoras verticales, o en un plano paralelo a dicho eje, en el caso de fresadoras horizontales, se encuentra la mesa de apoyo donde se sujeta la pieza que va ser fresada. Esta mesa suele llevar incorporada la posibilidad de desplazamiento en un plano horizontal según la dirección de los ejes X y Z en las fresadoras horizontales y X e Y en las fresadoras verticales. El desplazamiento según la dirección del eje restante puede incorporarlo la propia mesa o bien el cabezal, dependiendo de la solución mecánica adoptada por el fabricante.

Todos estos elementos son solidarios a una **bancada** que permite la fijación de la máquina-herramienta al suelo y proporciona rigidez estructural a cada uno de ellos.

Dadas las características de la fresadora, esta máquina-herramienta incorpora la posibilidad de realización de las operaciones descritas en el taladrado. Cuando la herramienta empleada es una fresa, puede realizar otras operaciones cuyas características principales son las siguientes:

- La herramienta empleada (fresa) es multifilo.
- Cada filo trabaja intermitentemente.
- La sección de viruta es variable.
- La fuerza de corte y la potencia no son constantes.

Las dos primeras características establecen una forma de trabajo de los filos de corte bien diferenciada frente a otros procesos de mecanizado descritos anteriormente. No obstante, y de manera análoga a como se realizó en el taladrado, llamando n_f al número de filos o dientes de la herramienta y f al avance por vuelta de la herramienta, puede definirse el avance por filo f_z como el cociente

$$f_z = \frac{f}{n_f}$$

El avance por filo representa la distancia que avanza la herramienta en la dirección de la velocidad de avance, en el tiempo durante el cual un filo arranca material. Sus unidades son, por tanto, [mm/rev/filo].

Tal y como se ha indicado, existen diversas operaciones que pueden ser efectuadas en la fresadora. De todas ellas, la operación más frecuente en la fresadora es la obtención de superficies planas en la pieza paralelas o perpendiculares al eje de rotación de la herramienta. Cuando la superficie plana obtenida es paralela al eje de rotación de la herramienta, el fresado se denomina **fresado cilíndrico, periférico o tangencial**. En el caso de una obtenerse una superficie perpendicular, el fresado se denomina **fresado frontal**.

Se describen a continuación las características principales de ambos tipos de fresado.

Fresado cilíndrico

También denominado fresado periférico o tangencial, el fresado cilíndrico suele efectuarse en fresadoras horizontales. La geometría más común de la operación de fresado cilíndrico es la recogida en la figura 41.

En dicha figura quedan representados el avance por filo (f_z), el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la profundidad de pasada (a_p), las velocidades de corte (v), de avance (v_f), y de rotación (N), el diámetro de la fresa (D), y el ancho de la fresa (B).

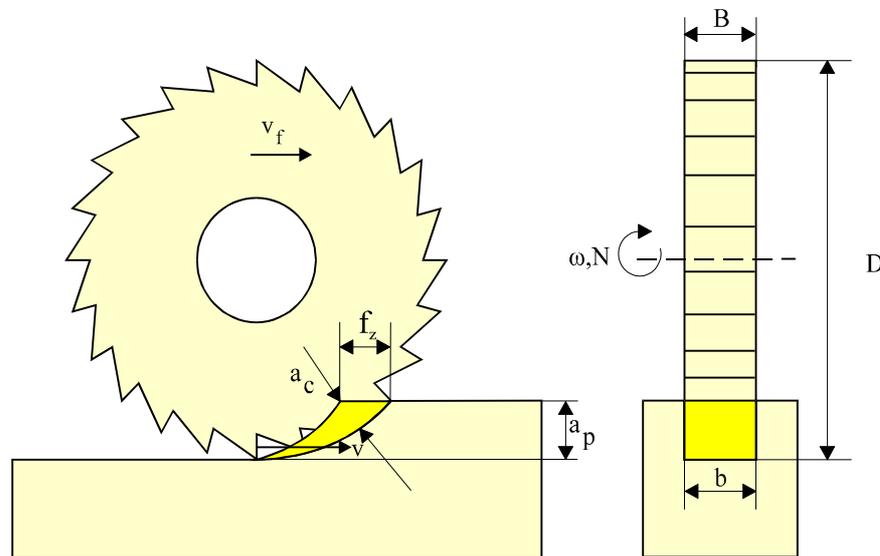


Figura 41.- Esquema de un proceso de fresado cilíndrico.

Puede observarse que en la situación representada en la figura, el ancho de corte b , coincide con el ancho de la fresa B . Esta situación no tiene porque producirse en todas las operaciones de fresado cilíndrico, cumpliéndose en cualquiera de los casos que $b \neq B$.

Puede observarse asimismo que el espesor de viruta indeformada (a_c) no es constante, alcanzando su valor máximo en la situación marcada en la figura. A consecuencia de ello, tampoco son constantes la sección de viruta (A_c), la fuerza de corte (F_c) y la potencia (\dot{W}).

El valor del espesor de viruta máximo puede calcularse de la siguiente forma aproximando la trayectoria seguida por un filo (cicloide) a la circunferencia definida por el diámetro de la fresa. Llamando θ al ángulo girado por la fresa durante el corte de un diente se tiene que

$$a_{cmax} = f_z \operatorname{sen} \mathbf{q}$$

Por otro lado se tiene que

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{D}{2} - a_p\right)^2 + \left(\frac{D}{2} \operatorname{sen} \mathbf{q}\right)^2$$

y por lo tanto

$$\operatorname{sen} \mathbf{q} = \frac{2}{D} \sqrt{(D - a_p) a_p}$$

expresión que puede aproximarse como

$$\operatorname{sen} \mathbf{q} \cong 2 \sqrt{\frac{a_p}{D}}$$

si se admite que la profundidad de pasada (a_p) es suficientemente pequeña en comparación con el diámetro de la fresa (D). De esta forma puede expresarse el espesor máximo de viruta indeformada como

$$a_{cmax} \cong 2f_z \sqrt{\frac{a_p}{D}}$$

Algunas otra expresiones que relacionan los parámetros del fresado cilíndrico son:

Sección de viruta: $A_c = ba_c$ (no constante)

Velocidad de corte: $v = \frac{p ND}{1000}$, donde D está expresado en mm, N en r.p.m. y v en m/min.

Velocidad de avance: $v_f = fN$

donde f está expresado en mm/rev, N en r.p.m. y v_f en mm/min.

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$ (no constante)

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v$ (no constante)

El cálculo de la potencia requerida en el fresado suele realizarse a partir del volumen de material eliminado por unidad de tiempo (\dot{z}). Éste se calcula como el producto del área perpendicular a la velocidad de avance multiplicada por dicha velocidad, es decir,

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo: $\dot{z} = Area \times v_f = a_p b \times fN$

De esta forma la **potencia de fresado cilíndrico** se obtiene como $Pot = \dot{W} = k_s \dot{z} = k_s a_p b fN$

Tiempo de mecanizado: Observando la figura 42, en la que se encuentran representadas las posiciones de la fresa en el inicio (i) y al final (f) del mecanizado, el tiempo de mecanizado puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \frac{l_m}{v_f} = \frac{l_e + l + \sqrt{a_p(D - a_p)} + l_s}{fN}$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y v_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la propia longitud a fresar (l), más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s), más la separación entre el eje de la fresa y el borde de la pieza en el instante inicial de contacto (distancia x en la figura).

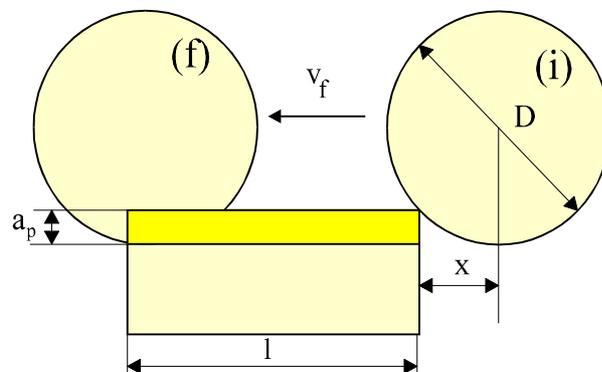


Figura 42.- Posiciones inicial y final de la fresa en fresado cilíndrico

En función de los sentidos de las velocidades de corte de la herramienta y de avance de la pieza, el fresado cilíndrico puede realizarse en dos formas, denominadas **fresado en oposición** y **fresado en concordancia**. En el fresado en oposición, los sentidos de ambas velocidades son opuestos, tal y como se indica en la figura 43. Por su parte en el fresado en concordancia los sentidos de ambas velocidades son coincidentes.

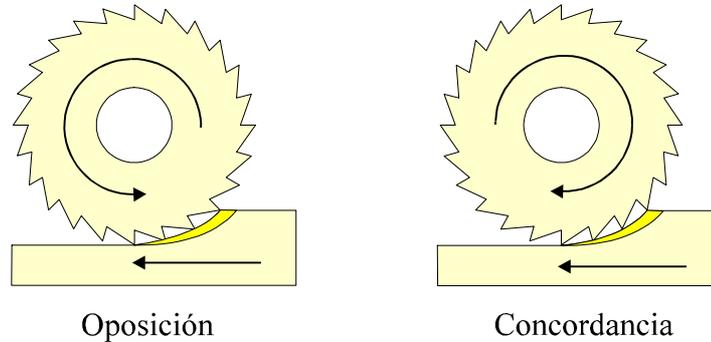


Figura 43.- Fresado cilíndrico en oposición y en concordancia

En el fresado en oposición, el crecimiento del espesor de viruta se produce de una forma más suave que en el fresado en concordancia. En éste último, el valor de espesor de viruta máximo se alcanza prácticamente en el inicio del corte por parte del filo, lo cual supone un impacto más brusco que origina mayores vibraciones en las guías de la máquina e incrementa la probabilidad de rotura del filo. Por otra parte el fresado en oposición tiende a "levantar" la pieza de su apoyo en la mesa, mientras que el fresado en concordancia tiende a reforzar dicho apoyo. La elección de uno u otro procedimiento, dado que los resultados geométricos obtenidos son semejantes en ambos casos, depende de la operación concreta que se esté efectuando, y en particular del tipo de fijación y de la rigidez estructural de la máquina-herramienta empleadas.

Fresado frontal

El fresado frontal, caracterizado por la perpendicularidad entre el eje de rotación de la fresa y la superficie fresada, suele efectuarse en fresadoras verticales. La geometría más común de la operación de fresado frontal es la recogida en la figura 44.

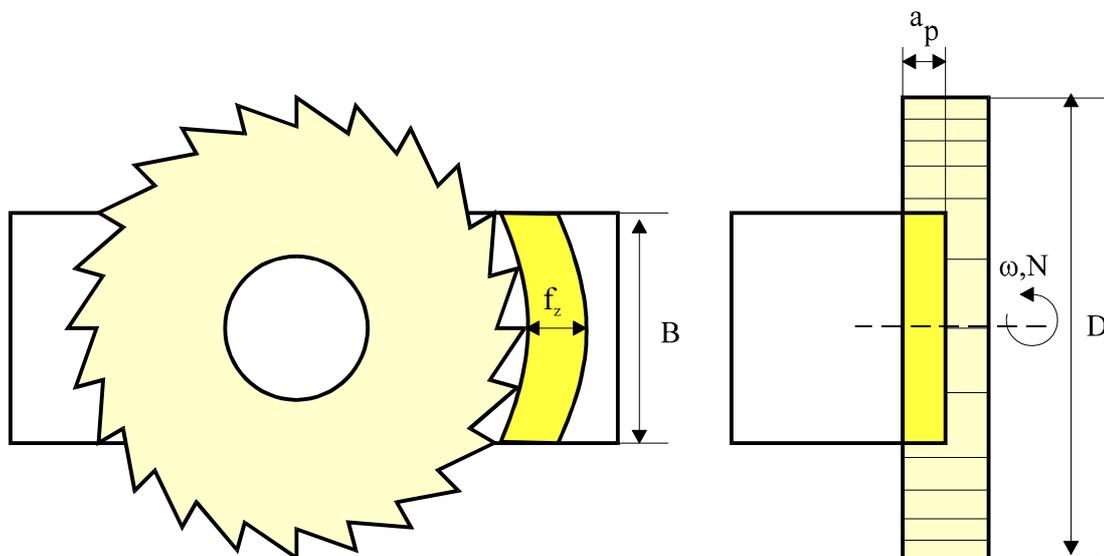


Figura 44.- Esquema de fresado frontal

En la figura 44 quedan representados el avance por filo (f_z), el ancho de corte (b), el espesor de viruta indeformada (a_c), la profundidad de pasada (a_p), las velocidades de corte (v), de avance (v_f), y de rotación (N), el diámetro de la fresa (D), y el ancho de la pieza (B). Puede observarse que en este caso, el espesor de viruta indeformada (a_c) es prácticamente constante, alcanzando su valor máximo para $a_{cmax} = f_z$.

Las expresiones que relacionan los parámetros del fresado frontal son análogas a las del fresado cilíndrico, teniéndose que:

Sección de viruta: $A_c = a_p a_c$

Velocidad de corte: $v = \frac{p ND}{1000}$, donde D está expresado en mm, N en r.p.m. y v en m/min.

Velocidad de avance: $v_f = fN$ donde f está expresado en mm/rev, N en rpm y v_f en mm/min.

Fuerza de corte (paralela a la dirección de la velocidad v): $F_c = k_s A_c$ (no constante)

Potencia requerida en el proceso: $Pot = \dot{W} = F_c v$ (no constante)

El cálculo de la potencia requerida en el fresado suele realizarse a partir del volumen de material eliminado por unidad de tiempo (\dot{z}). Éste se calcula como el producto del área perpendicular a la velocidad de avance multiplicada por dicha velocidad, es decir,

Volumen de material eliminado por unidad de tiempo: $\dot{z} = Area \times v_f = a_p B \times fN$

De esta forma la **potencia de fresado frontal** se obtiene como $Pot = \dot{W} = k_s \dot{z} = k_s a_p B fN$

Tiempo de mecanizado: Observando la figura 45, en la que se encuentran representadas las posiciones de la fresa en el inicio (i) y al final (f) del mecanizado, el tiempo de mecanizado puede calcularse mediante la expresión

$$t_m = \frac{l_m}{v_f} = \frac{l_e + \frac{D}{2} + l + \frac{D}{2} + l_s}{fN}$$

donde l_m representa la longitud de mecanizado y v_f la velocidad de avance. El valor de l_m se obtiene como suma de la propia longitud a fresar (l), más unas longitudes de entrada y salida de la herramienta (l_e y l_s), más la suma de las distancias de separación entre el eje de la fresa y el borde de la pieza en los instantes de comienzo y finalización del mecanizado (diámetro de la fresa).

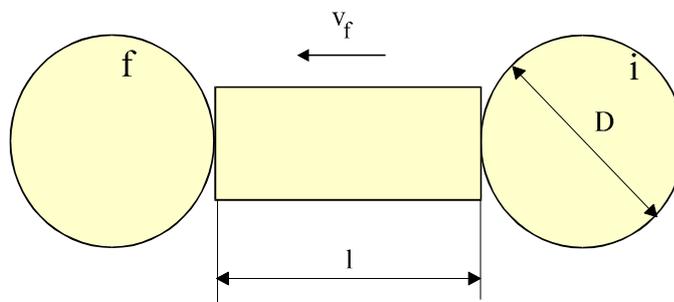


Figura 45.- Posiciones inicial y final de la fresa en fresado frontal.

APÉNDICE A: Términos español-inglés de uso común en mecanizado

Acero Rápido	High-Speed Steel	Limado	Shaping
Ancho de Corte	Cutting Width	Limadora	Shaper
Angulo de Deslizamiento	Shear Angle	Mandrinado	Boring
Ángulo de Desprendimiento	Rake Angle	Mandrinadora	Boring Mill
Ángulo de Incidencia	Clearance Angle	Mango	Shank
Avance	Feed	Máquina-Herramienta	Machine-Tool
Avellanado (cónico)	Countersinking	Material Eliminado por Unidad de Tiempo	Material Removal Rate
Avellanado (recto)	Counterboring	Moletado	Knurling
Brida	Clamp	Mortajadora	Vertical Shaper
Broca	Drill	Mortajadora	Slotter
Brocha	Broach	Muela de Rectificado	Grinding Wheel
Brochado	Broaching	Plato de Garras	Chuck
Brochadora	Broaching Machine	Profundidad de Pasada	Depth of Cut
Cabezal	Headstock	Punteado	Centering
Caja	Groove	Ranura	Slot
Cajeado	Grooving	Rectificado	Grinding
Carnero	Ram	Rectificadora	Grinder
Cepillado	Planing	Refrentado	Facing
Cepillo	Planer	Rosca	Thread
Chaflán	Chamfer	Roscado	Threading
Cola de Milano	Dovetail	Roscado con Macho	Tapping
Contrapunto	Tailstock	Sección de Viruta	Area of Cut
Eje	Shaft	Serrado	Sawing
Engranaje	Gear	Sierra Alternativa	Reciprocating Saw
Escariado	Reaming	Sierra Circular	Circular Saw
Escariador	Reamer	Sierra de Cinta	Band Saw
Espesor de Viruta Deformada	Chip Thickness	Taladrado	Drilling
Espesor de Viruta Indeformada	Uncut Chip Thickness	Taladradora	Drilling Machine
Fresa	Milling Cutter (Mill)	Tensión Dinámica de Deslizamiento	Shear Stress
Fresa Bailarina	End Mill	Torneado	Turning
Fresado	Milling	Tornillo	Screw
Fresado Cilíndrico	Peripheral Milling	Torno	Lathe
Fresado en Concordancia	Down Milling	Torreta	Turret
Fresado en Oposición	Up Milling	Tronzado	Cut-Off (Parting)
Fresado Frontal	Face Milling	Tuerca	Nut
Fresadora	Milling Machine	Velocidad de Avance	Feed Rate
Herramienta	Tool	Velocidad de Corte	Cutting Speed
Husillo	Spindle	Viruta	Chip