

159
2es.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DESGASTE DE HERRAMIENTAS DE CORTE DE
CARBURO EN CENTROS DE MAQUINADO

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

VICTOR HUGO VARGAS MACOSSAY

URIEL ZAMUDIO CHAVEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. OSCAR ESPINOZA RANGEL.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

MEXICO, D. F.

1998.

265922



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A Dios

Por brindarme la oportunidad de estar en este mundo.

A mi querida madre

Que es la mujer más importante en mi vida.

A mi hermano

Que aunque le tocó desempeñar una labor muy dura en este mundo, es una persona que admiro y respeto mucho.

A mis abuelos

Que aunque ya no se encuentran en cuerpo con nosotros, en espíritu siempre estarán conmigo.

A mis amigos y amistades

Por que sin su valiosa ayuda no hubiera concluido esto.

Al Ing. Francisco Paniagua Bocanegra

Por su colaboración tan importante en la realización de este trabajo.

A Blanca

Por su gran ayuda en la culminación de este trabajo.

“Cuando te sientas solo y derrotado piensa que si tienes aliento, manos y vida, ¡ lo tienes todo!”

Uriel Zamudio Chávez

A Dios

Te doy las gracias por hacer posible este triunfo.

A mis padres

Por su esfuerzo, cariño, comprensión y paciencia. Por que sin ellos nada de esto habría sido posible. ¡ Mil Gracias Viejos !

A mis hermanos

Por su apoyo y animación.

A Martha

Por ser la mujer más importante en mi vida y el principal aliciente para la culminación de esta etapa de mi vida.

A mis amigos

Por brindarme su amistad, apoyo y compañía.

Al Ing. Francisco Paniagua Bocanegra

Por haber contribuido enormemente en la realización de este trabajo.

Víctor Hugo Vargas Macossay.

Introducción	1
---------------------	----------

1. Centros de maquinado y control numérico. 4 a 24

Introducción	4
1.1. Máquinas con control numérico.	4
1.2. Control numérico y su evolución.	7
1.3. Bases del control numérico.	8
1.4. Ventajas del control numérico.	10
1.5. Perspectiva del CNC en la actualidad.	11
1.6. Tendencias en las áreas productivas y selectivas.	11
1.7. Tendencias y elementos auxiliares del CNC.	12

2. Herramientas de corte. 25 a 44

Introducción	25
2.1. Herramientas de corte para centros de maquinado.	26
2.2. Carburos para herramientas de corte.	29
2.3. Geometría de las herramientas.	37
2.4. Ángulos de corte.	40
2.5. Tipos de herramientas de corte.	43

3. Maquinabilidad. 45 a 51

Introducción	45
3.1. Maquinabilidad de los materiales.	46
3.2. Maquinabilidad de metales afectada por diversos factores.	48
3.3. Ensayos de maquinabilidad.	50

4. Mecánica de corte.	52 a 60
Introducción	52
4.1. Cálculo de las fuerzas de corte	55
4.2. Formación de virutas.	56
4.3. Tipos de virutas.	59
5. Fluidos de corte y su clasificación.	61 a 72
Introducción	61
5.1. Fluidos de corte.	61
5.2. Fluidos principalmente refrigerantes.	63
5.3. Fluidos principalmente lubricantes.	66
5.4. Clasificación.	67
6. Desgaste de herramientas de corte.	73 a 111
Introducción	73
6.1. Definición de los mecanismos de desgaste.	76
6.2. Mecanismos de desgaste.	77
6.3. Factores que influyen en el desgaste de las herramientas.	79
6.4. Efectos que produce el desgaste.	80
6.5. Duración de las herramientas de corte.	81
6.6. Patrones de comparación de desgaste.	87
6.7. Estimación de vida útil de herramientas.	108
Conclusiones .	112
Bibliografía.	115
Anexo.	

INTRODUCCIÓN

La razón principal por la cual se decidió investigar sobre el tema de desgaste de herramientas de corte en centros de maquinado, fue el darnos cuenta de la problemática que existe en las industrias manufactureras ocasionadas por el desgaste de las herramientas de corte y con lo cual este factor afecta directamente a los procesos, reflejándose esto en los costos y los tiempos de producción.

Con dicho estudio se trata de dar a conocer la importancia de los factores que originan el desgaste, así como los tipos más comunes que se presentan, tratando de proponer algunas alternativas de solución, apoyándonos en los conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería mecánica.

La investigación se enfocó en tres puntos medulares: el primero consistió en la recopilación de información teórica extraída de libros, revistas, catálogos de herramientas y folletos de datos técnicos. El segundo se basó en un estudio práctico en el cual dimos seguimiento a varios procesos de producción, realizando bitácoras de herramientas y recopilando datos reales de estos procesos. El tercer y último punto se desarrolló en investigaciones de campo visitando plantas y empresas de manufactura, con el objeto de conocer en qué forma afecta el desgaste a estas industrias.

El trabajo en cuestión consta de seis capítulos, conclusiones y bibliografía. En el Capítulo 1, denominado Centros de Maquinado y Control Numérico, se plantea un panorama general, desde el surgimiento de dicho controlador hasta las nuevas máquinas y tendencias que existen en la actualidad. Creemos conveniente introducir este tema por ser un factor importante para el análisis de dicho estudio, puesto que las herramientas analizadas se utilizaron en centros de maquinado; por consiguiente, algunos datos de bitácora fueron extraídos del contador de ciclos de la máquina para poder realizar un estudio de vida útil de herramientas, el cual se presenta en el capítulo seis. Por otra parte se consideró de interés

incluir y dar a conocer los aditamentos y sistemas de sujeción de herramientas para optimizar tiempos de maquinado.

En el Capítulo 2 Llamado Herramientas de Corte, mencionamos una breve historia de la evolución que han tenido éstas, desde el siglo XVIII hasta la actualidad. Este tema es importante puesto que resulta de gran interés para nosotros el saber y conocer, los tipos de materiales y herramientas que existen para centros de maquinado, así como su proceso de fabricación, las características que deben tener cada una de ellas, su nomenclatura y su geometría, entre otras cosas, las cuales se encuentran contenidas en este capítulo.

El Capítulo 3 Maquinabilidad, contiene una explicación general de lo que es la maquinabilidad de los materiales, los diversos factores que afectan a ésta, así como algunos ensayos de maquinabilidad. Este factor en la mayoría de los casos es de suma importancia puesto que la economía mayor no sólo depende de la elección apropiada de la herramienta y el control de muchos otros factores, sino que, en gran medida, la maquinabilidad tiene un efecto significativo en la duración o vida de la herramienta, en el acabado del trabajo y en la exactitud. Por lo tanto, la complejidad del problema y la dificultad de determinar las óptimas condiciones para un proceso, no son tan sencillas si no se toma en cuenta en gran parte este factor. Es por ello que consideramos de gran importancia el haber incluido este tema en nuestra investigación.

El Capítulo 4 Mecánica de corte, aborda las principales características de tal actividad, así como el cálculo de las fuerzas de corte, en donde intervienen todas aquellas características que actúan en tal operación, tales como fuerzas de corte, formación de virutas, tipos de virutas y la mecánica en acción. Es importante el conocer acerca de la mecánica de corte debido a que es una de las técnicas más significativas para el conformado de metales por arranque de viruta, el cual se lleva a cabo ejerciendo una fuerza tajante sobre la pieza de trabajo para desprender aquélla. Dicha fuerza actúa de modo directamente proporcional a la

condición de la herramienta manifestándose en ésta, en forma de desgaste, y el mismo efecto es causado por los diferentes tipos de virutas.

El Capítulo 5 Fluidos de Corte, trata de estos materiales con su clasificación, así como los efectos de los refrigerantes y lubricantes más usuales para operaciones de maquinado. Este tema, al igual que el de maquinabilidad punto focal de nuestro interés (desgaste de herramientas de corte), es de suma trascendencia, puesto que es determinante para la prevención y disminución notable de los efectos impropios.

En el último capítulo el 6 Desgaste de Herramientas de corte, mencionamos en general lo que implica el desgaste, los tipos del mismo, los factores que influyen y los mecanismos de desgaste, así como los efectos que se producen, la duración de las herramientas de corte a consecuencia del desgaste, los patrones de comparación, y un breve estudio sobre la estimación de la vida útil de las herramientas de corte.

Las conclusiones a las que se llega, tratan de expresar en breves líneas el resultado de los objetivos planteados, dando una visión global de la importancia y consecuencias de la investigación realizada.

1. CENTROS DE MAQUINADO Y CONTROL NUMÉRICO

INTRODUCCIÓN

La industria para la transformación de los metales tuvo un cambio drástico durante la Segunda Guerra Mundial, debido a que muchas de las aeronaves y misiles de la fuerza aérea norteamericana requerían de una complicada manufactura de piezas con un intervalo de tolerancia demasiado pequeño, que en las máquinas-herramientas convencionales no se podía alcanzar, y menos, en un futuro, satisfacer las necesidades. De esta manera, bajo contrato de la Fuerza Aérea de Estados Unidos y en la empresa Parson Corporation, se desarrollaron los sistemas de manufactura flexibles para obtener una máxima productividad en el desarrollo, y así poder cumplir con las tolerancias requeridas para el perfecto funcionamiento de las piezas, en pequeñas y medianas producciones. Esta empresa subcontrató con el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) un sistema servomecánico que se combinaría con el anterior. Los cambios fueron realizados exitosamente por el MIT, y en 1952 la máquina de tres ejes controlada con tecnología digital, fue desarrollada por Cincinnati Hydrotel. Esta tecnología fue denominada Control Numérico (CN). Es aquí donde comienza el desarrollo de los sistemas CN para máquinas-herramientas. Su origen fue la demanda de manufactura con alta exactitud de partes complicadas, y la necesidad de reducir el tiempo de producción.

1.1 MAQUINAS CON CONTROL NUMÉRICO

Con los autómatas, debido al costo de la programación, dicho control sólo se justificaba para grandes valores de producción. Sin embargo, con máquinas que posean control por retroalimentación, los programas pueden suministrarse en forma de cintas o tarjetas perforadas que son relativamente carentes de costo si se comparan con las levas de disco o de tambor. Estas máquinas son conocidas como **máquinas-herramientas de control numérico (CN)** y pueden usarse en la producción de pequeños lotes. El control numérico significa control con base en información numérica que especifica la posición relativa de la herramienta y de la pieza. En el siguiente diagrama de bloques para un

sistema de control de máquina-herramienta puede observarse que se han adicionado a una máquina estándar dos elementos esenciales. El primero es un medio de conducir la mesa de la máquina o el portaherramienta con un servomotor, y así el movimiento de la herramienta o de la pieza dependerá de la señal pasada al servomecanismo.

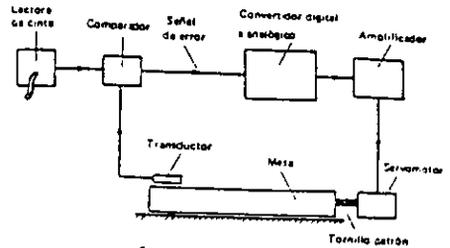
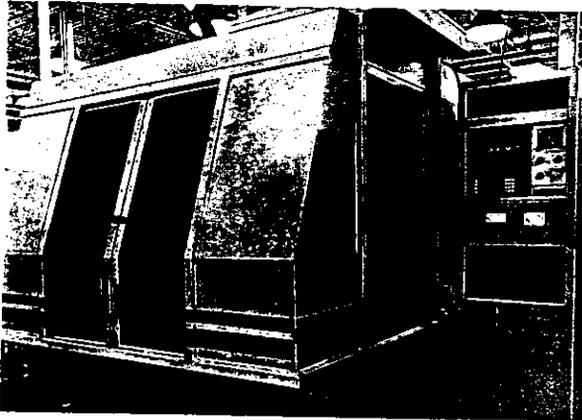


Fig 1.1. Equipo de esmeritado por CNC para producir Configuraciones consistentes y tolerancias muy cerradas. (Revista Balax/Hedeco).

La segunda adición es un transductor que capta continuamente la posición de la herramienta y de la pieza. La señal del transductor es comparada con la obtenida de la cinta y cualquier error es convertido a forma analógica, y amplificado y utilizado para accionar el servomotor hasta que las posiciones de la herramienta y de la pieza coincidan con la posición especificada por la información de la cinta.

Existen dos tipos básicos de sistemas de control numérico: el de punto a punto, o de posición, y el de trayectoria continua o de contorneado. El primero se aplica, por ejemplo, a una taladradora vertical. Si se tiene el control de los dos ejes horizontales de movimiento de la mesa que soporta la pieza, la máquina puede programarse para localizar y luego taladrar una plantilla de agujeros especificada. En el segundo sistema la trayectoria de la herramienta relativa a la pieza entre agujeros, no es importante y sólo se especifican las coordenadas del punto final de cada movimiento. El sistema de trayectoria continua se aplica, por ejemplo, a una fresadora vertical que se emplea para fresar un perfil complicado con una leva o una caja en una pieza. En este sistema la posición de la herramienta relativa a la pieza, debe controlarse continuamente mientras se están mecanizando las

piezas. Aquí la posición se especifica por una serie de coordenadas, y el sistema de control está diseñado para seguir por interpolación una trayectoria entre estos puntos. Algunas máquinas siguen una trayectoria recta basada en el método de interpolación lineal, y otras una trayectoria curva con base en una interpolación circular.

El control numérico puede aplicarse a movimientos a lo largo o alrededor de cualquier eje, pero los sistemas de control que manejan dos y tres ejes son los más comunes. En general, las fresadoras verticales y los tornos usan el control de trayectoria continua. Las taladradoras de plantillas, las verticales y las pequeñas fresadoras usan el control de punto a punto.

Un refinamiento del control numérico es el control adaptativo. Este tipo de sistema puede adaptarse de acuerdo con las circunstancias que se presenten. Tales condiciones se miden por el sistema mismo y pueden incluir la potencia requerida para la operación de mecanizado, el desgaste de la herramienta o de la muela, las fuerzas generadas, o la presencia de vibraciones inducidas. El sistema podría idealmente diseñarse para ajuste automático de avance, velocidad o posición de la herramienta, a fin de producir piezas al mínimo costo y dentro de las tolerancias especificadas. Un sistema de esta clase sería muy costoso, y hasta la fecha no se le ha encontrado una amplia aplicación.

Un sistema de control adaptativo relativamente simple podría variar automáticamente la velocidad de corte y el avance, de manera que maximice la remoción de metal por unidad de tiempo, sin exceder valores predeterminados de fuerzas de corte y consumo de potencia. Los sistemas de este tipo son relativamente de bajo costo y pueden operar muy cerca de las condiciones óptimas.

1.2 CONTROL NUMÉRICO Y SU EVOLUCIÓN

Los primeros controladores numéricos se emplearon en los años 50, y usaban tubos electrónicos al vacío, los cuales eran extremadamente largos. Posteriormente en la década de 1960 los controladores de bulbos fueron sustituidos por los de transistores, los cuales contenían circuitos lógicos y controles digitales. Estas unidades fueron más rentables. Posteriormente, la tercera generación de controles numéricos fueron los que utilizaron circuitos integrados o chips, que por lo mismo son menos costosos, más rentables y menos voluminosos. Muchos de estos controladores de la tercera generación continúan en operación. Un importante avance en la evolución de las máquinas-herramientas controladas numéricamente, tuvo lugar en los años 70. La combinación de la computadora con el control numérico dio como resultado el **Control Numérico Directo (DNC)** que a su vez originó el **Control Numérico Computarizado (CNC)**.

El funcionamiento del CNC consiste en información almacenada en la computadora, que permite actuar de manera automática y repetitiva en el maquinado. En el DNC a diferencia del CNC, todo es controlado por una computadora central, pero básicamente el principio del funcionamiento es el mismo. De los dos tipos de controladores mencionados, el CNC fue mucho más viable para ser usado en los sistemas de manufactura, quizás por su flexibilidad y menor costo. La preferencia del CNC sobre el DNC se incrementa como resultado de la capacidad y bajo costo de las minicomputadoras y las microcomputadoras. Uno de los objetivos de los sistemas CNC es remplazar con software, tanto como sea posible, el hardware de control numérico convencional, y simplificar el hardware remanente. Existen muchas maneras de compartir el software con el hardware en dichos sistemas, pero todos involucran algún hardware en sus controladores. El software de CNC consiste en no menos de tres programas: 1) programa básico, 2) programa de servicio, y 3) programa de control. El programa básico contiene una descripción de la configuración que va a ser producida y las condiciones de corte, así como el manejo de velocidad y el rango de alimentación. El programa de servicio sirve para comprobar, evitar y corregir las partes del programa, así como para un diagnóstico de la corrida del mismo. El programa de control acepta para el programa básico, como entrada de datos y produce señales para el manejo del

movimiento de los ejes de la máquina.

Los controladores de CNC en los años 80 son más poderosos y utilizados que las primeras unidades. Incorporan la localización de problemas como diagnósticos, autopruebas de los controladores y un modo de simulación, mientras se usa en el análisis de la parte del programa sin movimiento de ejes. Muchos controladores ofrecen grandes facilidades de programación en tres dimensiones, animación de las herramientas con gráficos, base de datos de las herramientas y la preselección de los parámetros de corte. Las modernas máquinas con control numérico funcionan como estaciones de trabajo en una red local, y esto permite la comunicación con otros controladores. En un futuro esto será integrado a un sistema de manufactura flexible. El control numérico fue introducido y desarrollado por la industria metal-mecánica y la gran concentración de equipos de control numérico permanece en el maquinado de metales. El CNC ha sido exitosamente implementado para equipos de torneado, fresado, taladrado, laminado, etc. Es importante recalcar que el control numérico ha hecho posible el desarrollo de máquinas con capacidades básicas que sobrepasan a la de las máquinas convencionales. Por ejemplo, las sofisticadas fresadoras de control numérico, que mantienen un control sobre cinco ejes de movimiento y pueden literalmente esculpir superficies complejas. Una nueva faceta de las máquinas de CNC es el centro de maquinado, que incorpora las funciones de muchas máquinas en una sola. Un centro de maquinado puede tener múltiples herramientas para realizar operaciones como taladrado, fresado, etc. Un centro de torneado es un equipo con gran capacidad y con herramientas de cambio automático. Otros tipos de máquinas de CNC incorporan soldadoras, laminadoras, troqueladoras, extrusoras, etc.

1.3 BASES DEL CONTROL NUMÉRICO

Los dispositivos controlados numéricamente han sido definidos por la industria electrónica, como un sistema en el cual las acciones son controladas por la inserción directa de datos numéricos. Un sistema de control numérico típico, requiere de datos numéricos para la producción de partes, los cuales están contenidos en un disco o cassette y son parte del programa. La parte del programa se toma de los bloques de información, los cuales contienen los datos numéricos que se requieren para la producción de la pieza de

Dichos bloques contienen en forma codificada toda la información requerida para la fabricación de la pieza de trabajo, los datos dimensionales y la forma del entorno de los dibujos de ingeniería. Las dimensiones son ordenadas separadamente por cada uno de los ejes en movimiento. Las funciones auxiliares, la velocidad de corte y el rango de alimentación se programan de acuerdo con los requerimientos de maquinado de la superficie final y, por último, con las tolerancias. Si se realiza una comparación de las máquinas de control numérico con las máquinas convencionales, éstas reemplazan la mano de obra del operador. Como en las máquinas convencionales, la pieza se fabrica por movimientos del útil de corte a lo largo de la pieza de trabajo, y esto se realiza por desplazamientos que son controlados por el operador. Por otro lado, los operadores sólo necesitan un monitor de operaciones en la máquina para realizar el trabajo y sólo se efectúa el cambio de la pieza manualmente. Las operaciones más complicadas ahora son incluidas en la parte del programa, y no las efectúa el operador. Estos sistemas son caros, inteligentes y sofisticados, por lo que se requiere de personal especializado para el óptimo funcionamiento del sistema de control numérico. Las características que debe poseer un buen operador son: conocimientos de ingeniería, mecánica, fluidos de corte, maquinabilidad, parámetros de corte, velocidades de corte, y herramientas, así como técnicas de reparación y procesos técnicos que son de gran importancia. La parte de programación tiene una relación directa con la función de las herramientas de la máquina y los procesos de la misma. El programa es realizado manualmente según un lenguaje de computación.

En dichas máquinas cada eje de movimiento se controla independientemente. El manejo de dichos ejes es realizado por un motor, un actuador hidráulico o neumático, o bien por un motor de paso, de acuerdo con los requerimientos de cada máquina.

1.4 VENTAJAS DEL CONTROL NUMÉRICO

Una de las mayores ventajas de este sistema es la reducción de empleados, ya que un solo empleado es capaz de usar más de una máquina; realmente la ventaja no consiste en bajar los costos, sino que se incrementa la producción. El tiempo de instalación de este sistema es reducido y la producción es incrementada notablemente, ya que una gran cantidad de tiempo es aprovechada durante el maquinado, mientras pasa la pieza de trabajo de una operación a otra. A diferencia de los sistemas convencionales, en los cuales se pierde tiempo entre cada proceso de fabricación, ya que el operador debe parar el proceso entre cada operación para revisar las dimensiones de la pieza de trabajo, lo cual se ha comprobado que da un tiempo perdido aproximado del 70% al 80% del total. La secuencia de producción es reducida por el agotamiento físico del operador, a diferencia de lo que sucede en los sistemas CNC en los que estos problemas no existen. El control numérico produce partes de alta calidad, y su manufactura es la más exacta posible, puesto que tiene una tolerancia de error muy pequeña y maneja diseños tan complejos que en las máquinas convencionales sería muy difícil realizarlos. Los entornos en tres dimensiones no pueden ser controlados por un operador manualmente. Si comparamos los métodos convencionales de maquinado, las máquinas de CNC tienen las siguientes ventajas:

- Completa flexibilidad; sólo se necesita un programa para producir una parte nueva.
- La precisión se mantiene a través de todo el rango de velocidades y alimentación.
- Tienen la posibilidad de maquinar una pieza de entorno complicado.
- Un corto tiempo de producción.
- Alta productividad, permitida mediante el aprovechamiento del tiempo, trabajo de un solo operador para realizar las operaciones mediante un monitor e incluso automatización completa de la operación.
- Tolerancias de error en el maquinado muy pequeñas.

1.5 PERSPECTIVA DEL C.N.C. EN LA ACTUALIDAD

Actualmente en el mercado se pueden encontrar máquinas-herramientas que poseen muchas características como: 1) permitir controlar cinco o más ejes de trabajo simultáneos; 2) poder realizar superficies de acabado complejas, con márgenes de error reducidos en el maquinado; 3) posicionamiento e interpolación de operación de la máquina, y alta capacidad de almacenamiento de herramientas, así como compensación automática de las mismas, e incluso existen máquinas que alcanzan hasta 12,000 r.p.m; 4) grandes velocidades de corte y potencias de acuerdo con los requerimientos. Lo anterior define las cualidades que se pueden aprovechar de estas máquinas. Con el paso del tiempo, se ha encontrado que usando los dispositivos de corte adecuados, se obtiene la máxima ventaja de las máquinas de CNC. Para cumplir con este requisito se desarrollan continuamente nuevos tipos de materiales, cada vez con mejores características.

Entre las condiciones que deben cumplir la herramienta de corte y la máquina-herramienta; están las que cuando se tiene una máquina con grandes recursos, pero la herramienta no es capaz de trabajar bajo las condiciones de corte de la máquina, ésta no se aprovecha al máximo, y viceversa.

1.6 TENDENCIAS EN LA ÁREAS PRODUCTIVAS Y SELECTIVAS

El acceso a la tecnología en materia de máquinas de CNC y herramientas de corte es igual en todo el mundo; si surge un producto nuevo en el mercado, en pocos días se puede encontrar en nuestro país. Sin embargo, el empleo de tecnología en México comúnmente no está actualizado, por las condiciones económicas, culturales y de mercado diferentes en cada nación. En México, la falta de capital y de competencia propició un retraso en el nivel tecnológico, pero a partir de la aplicación del Tratado de Libre Comercio de Norteamérica (TLC) se aplican adelantos de gran importancia, y los empresarios se han esforzado por modificar y actualizar sus centros de producción para poder estar a un nivel competitivo. La necesidad de productos de menor costo y mayor calidad no deja muchas opciones, pero lo que si se puede dar por cierto, es que si quiere permanecer en el mercado, estas industrias tendrán que ofrecer lo mejor, y esto sólo se logra con tecnología avanzada.

1.7 TENDENCIAS Y ELEMENTOS AUXILIARES DEL C.N.C.

Durante los años 80 se lanzó al mercado el sistema de herramientas modular con los sistemas Varilock (máquinas-herramientas para fresado, taladrado y centros de mecanizado) y BTS (para tornos). La experiencia práctica demostrada en más de 25,000 máquinas equipadas en todo el mundo con estos sistemas, confirma que es muy confiable y económico invertir en este ramo.

Sistema BTS

La clave de una producción "Just in time" (Justo a tiempo) es:

- Pedidos de cantidades producción más pequeñas.
- Plazos de ejecución más cortos.
- Menos capital invertido en existencias (stocks).
- Mayor seguridad en el suministro. Gracias a una gran reducción de los tiempos improductivos de la máquina ello se ha conseguido.
- Una reducción de los tiempos de montaje de la herramienta, a menudo de un 30% al 50% .
- Un cambio más rápido de las herramientas.
- La reducción del tiempo requerido para el cambio de la herramienta permite utilizar datos de corte más complicados.

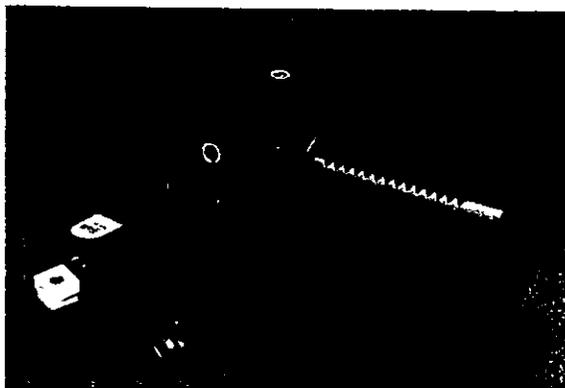


Fig. 1.2. vista de un sistema BTS. (Sandvik/Coromant).

Sistema Varilock

- Permite una mayor racionalización del programa de herramientas.
- Una mayor flexibilidad en el uso de las herramientas, aunque tengan diferentes husillos.
- Lotes de herramientas menores.

Los sistemas de herramientas modulares

- Permiten mejorar la productividad de las herramientas y máquinas.
- Son básicos en el proceso gradual de automatización.
- El uso de chips electrónicos en herramientas modulares individuales abre el camino a la gestión de herramientas.

Sistemas actuales

La filosofía de producción en su momento tuvo un paso importante en la industria y la ingeniería de los años 80 y tendrá mayor impacto durante los años 90. La meta a seguir es lograr la mecanización completa de una pieza en un solo montaje en una máquina o grupo de máquinas conectadas a una unidad de producción. Esto se refleja en un aumento de la eficacia, permitiendo así la producción de lotes aún más pequeños, lo que acorta el tiempo de producción.

Uno de los sistemas actuales más utilizados es el de las máquinas combinadas. Las máquinas en combinación para torneado y fresado, de reciente aparición en el mercado, han sido diseñadas para satisfacer las demandas de las máquinas "versátiles". Pero para que su potencial sea explotado al máximo, se hace esencial el uso de un sistema auténtico de una herramienta modular.

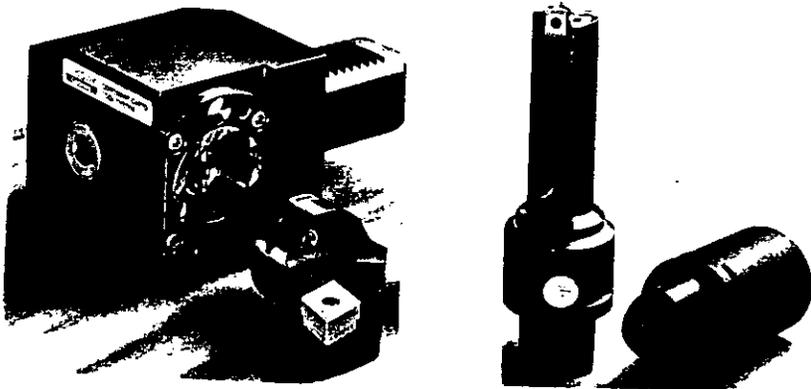


Fig. 1.3. Vista de uno de los muchos sistemas actuales de Herramientas. (Sandvik/Coromant).

Herramientas modulares

Con el aumento de los gastos de desarrollo en la industria y la ingeniería de manufactura, se incrementaron así mismo los requisitos exigidos a las máquinas-herramientas, con el fin de conseguir una elevada productividad, especialmente a través de la estandarización de las herramientas. Esto no sólo se aplica a las máquinas propiamente dichas y a las células de mecanizado, sino también al conjunto de los talleres de gran volumen de producción y a las fábricas más complejas.

Las herramientas de torneado soldadas y los últimos portaherramientas con pequeñas placas intercambiables, se pueden considerar puntos de partida, hacia el concepto de herramientas modulares y el desarrollo de un torno moderno.

El sistema BTS, desarrollado por Sandvik Coromant a principios de los años 80 con el propósito de lograr una mayor productividad de las herramientas de torneado, representó un paso importante en relación con el concepto de los sistemas de herramientas modulares. Para la década de 1990, se presentó un sistema innovador y único en su género llamado (Coromant Capto[TM]), un sistema de herramientas de propósitos múltiples, adecuado para la mayoría de las operaciones de corte de metal.

El concepto de herramientas modulares es muy sencillo: dividir el portaherramientas en dos partes, una unidad de corte pequeña y fácil de manejar, y una unidad de sujeción estable, que se puede utilizar en cualquier posición predeterminada. Mediante un acoplamiento sencillo y de alta precisión entre estas dos unidades, se asegura un elevado grado de precisión y estabilidad; el cambio de herramienta se podrá efectuar de manera muy rápida y efectiva desde el punto de vista económico.

Las herramientas modulares ofrecen ventajas que han contribuido a impulsar su crecimiento, proponiéndolas como la mejor opción para muchas máquinas-herramientas.

Estas ventajas son:

- Tiempos de mecanizado más efectivos.
- Reducción de las paradas por cambios de herramientas y ajustes, por lo cual el mecanizado de pequeños lotes resulta más económico.
- Posibilidad de estandarizar y racionalizar el uso de herramientas.
- Opción de una gestión de herramientas y mecanizado flexible.
- Amplia disponibilidad y rendimiento.

- Eliminación de las paradas para tomar mediciones.

Sistemas flexibles

La introducción de esta nueva generación de máquinas no significa la desaparición de las máquinas tradicionales, sino que, por lo contrario, habrá una gran necesidad del uso de tornos, fresadoras, taladradoras y centros de mecanizado.

El medio de producción del futuro no consistirá en una combinación equilibrada entre las máquinas compuestas y las tradicionales, sino que, por el contrario, habrá una gran necesidad de tal conjunto de máquinas y herramientas.

También será una combinación equilibrada entre las máquinas compuestas y las tradicionales en instalaciones flexibles, teniendo como común denominador un sistema de herramientas universal que se adapte por igual a todas las operaciones de mecanizado.

Sistemas de uso múltiple

Los sistemas modulares ofrecen la misma eficiencia para el torneado, fresado y taladrado, independientemente del sistema de operación o tipo de máquina. En el momento de emprenderse el desarrollo de este tipo de sistemas en la década de 1980, el sistema BTS era ya ampliamente utilizado como sistema de vanguardia en el campo de dichas herramientas. En relación con los sistemas de herramientas modulares, el diseño de acoplamiento entre las unidades de corte y sujeción, es el que determina su eficiencia y áreas de aplicación. Ahora, el polígono de acoplamiento cónico es uno de los sistemas más modernos. Este acoplamiento transfiere considerables pares de torsión sin utilizar los dientes, llaves, bolas o pasadores tradicionales, y sin contener ninguna pieza suelta. El polígono cónico, tensado en la unidad de fijación con una fuerza de precarga de varias toneladas, produce una junta extremadamente estable. A la vez, la herramienta se puede extraer fácil y rápidamente, ya sea manual o de modo automático.

La amplia superficie de contacto permite una transmisión de par sin deslizamiento, en ambas direcciones, lo que proporciona una baja presión de superficie, un menor desgaste y, en consecuencia, una mayor exactitud de posicionamiento. El efecto de autocentrado y autoalineación del acoplamiento, asegura una precisión radial y un mínimo salto axial.



Fig. 1.4. Vista de un sistema de uso múltiple (Sandvik/Coromant).

Sistemas de herramientas universales

Este concepto ha pasado a ser una realidad. Un sistema eficiente con tornos de husillos giratorios, centros de fresado y torneado, centros de mecanizado y sistemas de manufactura flexibles, puede tener un cambio automático por su compatibilidad. El programa incluye las herramientas de corte y adaptadores más modernos con el objeto de satisfacer todos los tipos de operaciones, desde el desbaste hasta el acabado. Conforme se desarrolla el CNC se requiere de herramientas cada vez más resistentes y con mejores características de corte. Si bien la necesidad de nuevos materiales para herramientas de corte es ya una realidad, los sistemas de CNC y sus accesorios, están a la vanguardia. Las condiciones de aplicación cada vez son mayores por las grandes velocidades y potencias de las nuevas máquinas, y pensando en satisfacer las condiciones que se presentarán con las nuevas herramientas, se han desarrollado sistemas de sujeción como el BTS y el Varilock mencionados anteriormente, así como el acoplamiento del polígono cónico, capaz de soportar los esfuerzos producidos en los nuevos sistemas.

Los sistemas de sujeción cada vez son más sencillos, fáciles y rápidos de colocar y retirar, compatibles con todas las nuevas máquinas, sistemas automatizados de alimentación y de retiro de herramientas, incremento de las revoluciones y potencias, sistemas de máquinas combinadas e instalaciones flexibles. A pesar de todo esto, existe un gran abismo entre las máquinas-herramientas CNC y las herramientas que éstas deberían emplear.

Actualmente existen máquinas que pueden cortar hasta un centímetro de material por pasada. Sin embargo no hay herramienta que lo soporte. De aquí, la dependencia entre el desarrollo de las máquinas y las herramientas de corte; por lo tanto, sin herramientas con las características suficientes, no se podría aprovechar al máximo la máquina-herramienta.

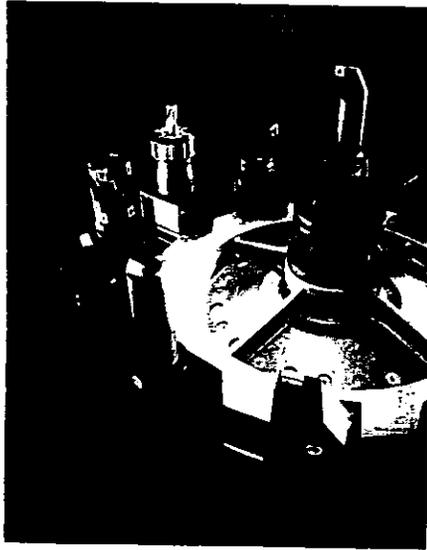


Fig. 1.5. Vista de un sistema universal moderno de maquinado (Sandvik/Coromant).

Unidades de corte

Actualmente existen extensos programas de unidades de corte que pueden ser completados con herramientas especiales diseñadas a la medida. Estas unidades son de peso reducido, con el objeto de facilitar su manejo e intercambio y ajustarse mejor a los conceptos de gestión de herramientas.

La posibilidad de ajustar la altura del centro del filo de corte y el suministro de refrigerante, son algunas de las importantes ventajas de este sistema.



Fig. 1.6. Aspecto de una unidad de corte BTS. (Sandvik/Coromant).

Sistemas de sujeción

Este tipo de sistemas establece una posición fija de referencia en la máquina. Cuenta con diferentes aditamentos de montajes para todos los tipos, como mango, VDI, etc. lo que significa que el BTS aporta intercambiabilidad entre posiciones de herramientas y máquinas. La unidad de sujeción BTS es el adaptador universal para las unidades de corte BTS, a utilizar en cualquier posición predeterminada. Se consigue una elevada estabilidad gracias al apoyo axial de la unidad de corte. La posición del eje del tirante asegura que la presión de sujeción neutralice directamente las fuerzas de corte de la herramienta. El pequeño par torsor y la corta carrera del tirante contribuyen a un cambio sencillo y eficaz de la herramienta.

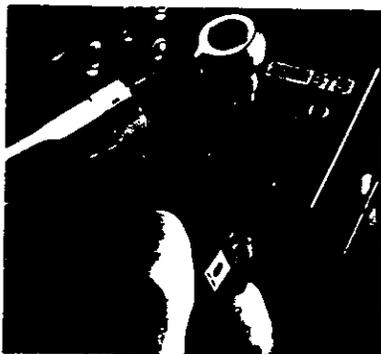


Fig. 1.7. Vista de una unidad de sujeción con intercambiabilidad entre posiciones de herramientas. y máquina (Sandvik/Coromant).

Cambio de herramientas semi-automático

Las unidades de sujeción de funcionamiento automático, permiten soltar las herramientas de corte de la máquina, sólo con pulsar un botón. Están basadas en una sujeción por muelles y un desembridado hidráulico, y van incorporadas a la torreta de la máquina o a la posición de la herramienta. La fuerza de un pivote que actúa en la parte posterior de la unidad de sujeción, desembrida la unidad de corte del acoplamiento. Para ciertos tornos se encuentran disponibles, como opción, torretas con sistemas de circuito hidráulico cerrado, que permiten aflojar la herramienta en cualquier posición, optimizando de esta forma los procesos y costos de producción.



Fig 1.8. Un cambio de herramienta. semi-automático (Sandvik/Coromant).

Sistemas para la gestión de herramientas

Actualmente los fabricantes de herramientas ofrecen una gama de productos muy extensa, con el objeto de facilitar el proceso de corte. Estos productos incluyen sistemas de procesamiento de datos de herramientas, equipos de automatización y organización de herramientas, así como sistemas de supervisión de herramientas y control del proceso. Cada uno de estos productos contribuye a mejorar el corte de metales, proporcionando datos de corte más correctos, incrementando el uso de la máquina y la seguridad de producción y mejorando, por lo tanto, la calidad de las piezas.



Fig. 1.9. Unidad de procesamientos de datos de herramientas. (Sandvik/Coromant).

Coro Plan

Es un sistema de planificación del funcionamiento de una máquina, que permite generar programas de trabajo y datos técnicos. Este sistema ayuda a elegir las herramientas más adecuadas y optimizar los datos de corte, para piezas de cualquier material. Su base de datos es de 12 MB, la cual contiene datos tecnológicos de gran valor reunidos durante muchos años por fabricantes. Además permite incrementar la eficacia de corte y reducir el tiempo de planificación del trabajo, asegurando una productividad homogénea. Por último Coro Plan transfiere los datos directamente a los sistemas Coro CAM y Coro TAS.



Fig. 1.10. Programa y datos para reducir el tiempo de planificación del trabajo (Sandvik/Coromant).

Coro TAS

Es un sistema de gestión logística de las herramientas, especialmente diseñado para el control de los stocks y del flujo de herramientas hacia y desde las máquinas. Este sistema asegura que las herramientas se recojan, preparen y entreguen en el lugar adecuado, a el momento conveniente. Coro TAS incrementa el uso de la máquina, permite reducir los costos de herramienta y asegura una transferencia exacta de los datos de corte.

Sistema de identificación

Comprende un programa completo de etiquetas electrónicas, que se pueden instalar en las herramientas de corte. Ello permite que los datos de corte como, por ejemplo, identificación, instrucciones, mediciones e historial se puedan transferir a la herramienta. Estos datos pueden ser introducidos, actualizados o visualizados, en cualquier lugar de la planta, mediante equipos de lectura/edición.

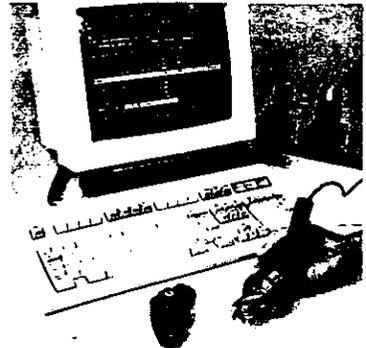
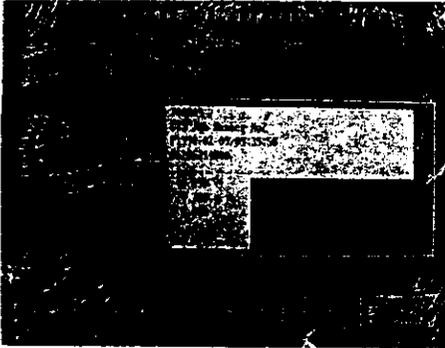


Fig.1.11. y Fig. 1.12. Despliegue en pantalla del software Coro TAS y el sistema de identificación Coromant que permite que los datos de corte se puedan transferir a la herramienta. (Sandvik/Coromant).

Coro CAM

Este sistema gráfico de programación CN está vinculado con Coro Plan, y genera y verifica los programas CN de las máquinas CNC, mediante la entrada de datos técnicos desde Coro Plan. Coro CAM requiere menores esfuerzos por parte del programador CN, incrementa la productividad de la máquina y confirma los métodos antes de mecanizar. También permite la transferencia directa de programas CN, a través del sistema DNC, al control de la máquina.

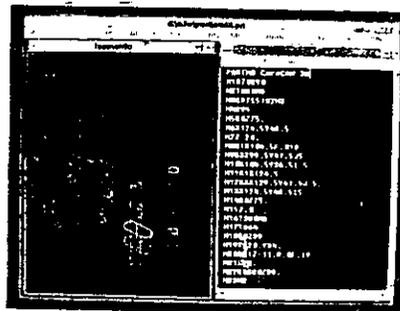


Fig. 1.13. Gráfico y listado de manufactura asistida por computadora (Sandvik/Coromant).

Coro Net

Es un sistema DNC de recopilación de datos, que almacena e intercambia programas CN y datos de herramientas en el conjunto del taller. Este sistema reduce los tiempos de espera de la máquina e incrementa la eficacia del mecanizado. Incluye módulos para la elaboración de informes y estadísticas, con el objeto de mejorar la gestión del rendimiento y eficacia de las máquinas-herramientas.

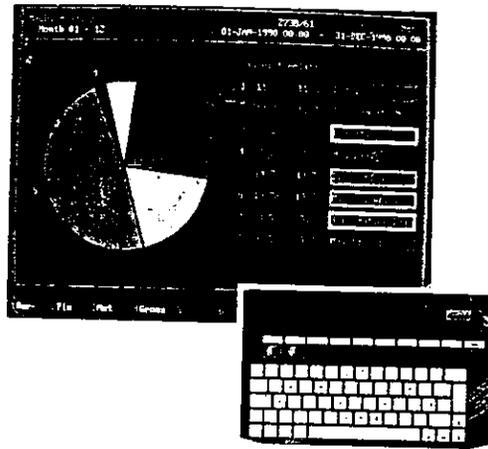


Fig. 1.14. Sistema de control numérico directo de recolección de datos (Sandvik/Coromant).

Automatización y organización de las herramientas

Algunos fabricantes presentan una gran variedad de productos modulares de automatización de herramientas.

- Unidades motorizadas para aplicaciones de fresado-torneado.
- Pinzas para sistemas de cambio automático de herramientas.
- Almacenes de herramientas modulares incorporados a la máquina.
- Sondas de medición.
- Cassettes y contenedores para el almacenamiento de herramientas.

Sistemas de control de herramientas

Comprende una gama de sensores y elementos electrónicos de control. Diseñado en un principio para operaciones de taladrado y torneado, el sistema comunica inmediatamente al operario de la máquina la existencia de problemas en las operaciones de mecanizado. Sus ventajas principales son la reducción de las paradas de la máquina y la seguridad de mecanizado. Este sistema representa un elemento esencial en la mayoría de los procesos automatizados.

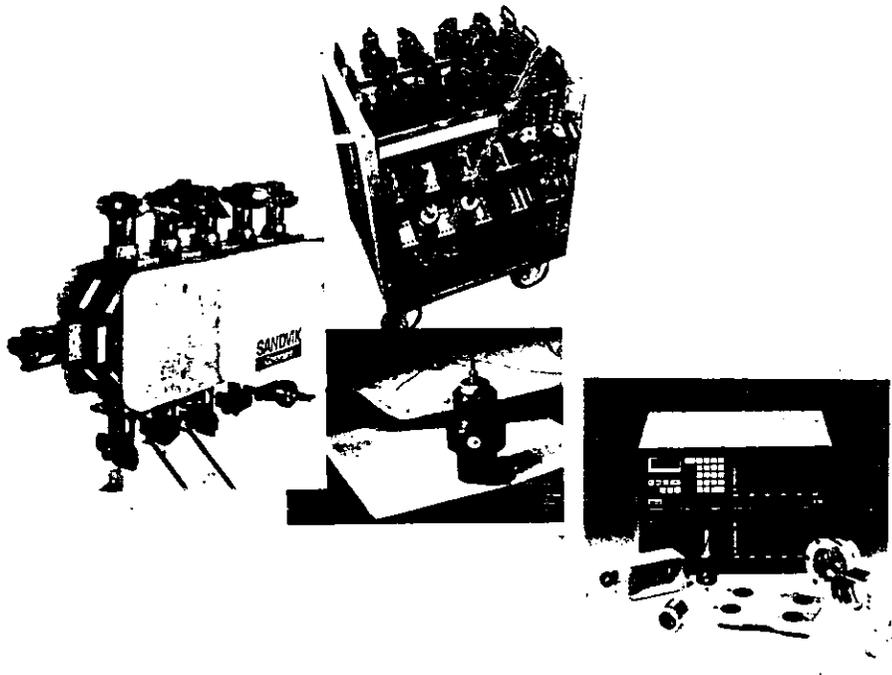


Fig. 1.15. Variedad de productos modulares de automatización de herramientas.(Sandvik/Coromant).

Auto Comp

Es un sistema para taladrado de alta precisión, que utiliza herramientas estándares controladas mediante elección electrónica avanzada. Además aporta la mayor exactitud en el mandrinado de precisión y taladrado de paquetes, incluyendo las operaciones de acabado y mandrinado escalonado. Se pueden conseguir tolerancias de $+ 0.001$ pulgadas utilizando plaquitas estándares de metal duro o cerámica.



Fig. 1.16. Equipo para taladrado de alta precisión (Sandvik/Coromant).

Lo que se pudo investigar, y resulta de gran interés sobre estos sistemas, fue que los fabricantes de estos aditamentos se actualizan y comunican tres veces al año en coordinación con los paquetes de introducción de nuevos productos. Por lo tanto les permiten ser vanguardistas y competitivos tecnológicamente, además de satisfacer a las industrias manufactureras.

2. HERRAMIENTAS DE CORTE

INTRODUCCIÓN

En la segunda mitad del siglo XVIII comienza la historia del corte de metales; antes de esa época no existían las máquinas-herramientas, y durante mucho tiempo los artesanos confeccionaban ellos mismos los útiles que necesitaban. Esta fabricación era un secreto familiar de "alquimia" que solo conocían los sabios, o los físicos de antaño. Desde los comienzos de la industria, el hombre cortó trozos de árbol para diversos usos, con el fin de satisfacer sus necesidades, particularmente para fabricarse mazos, barras para ejes, mangos, etc. Desde entonces se ha visto en la necesidad de descortezar y moldear tales objetos para hacerlos más lisos, cómodos de sostener, y manejarlas sin que le lastimen.

La **herramienta** ha tenido una enorme importancia en la vida del hombre desde todos los tiempos; una prueba de ello son las clasificaciones establecidas en el estudio de la prehistoria. Estas clasificaciones se extienden sobre un gran número de años, en los que se comprueba un avance determinado de la civilización, y corresponden siempre a los perfeccionamientos de las herramientas.

A medida que pasa el tiempo se aprecia más la importancia de tal medio útil. Anteriormente los centros de investigación de estudios de las máquinas-herramientas, dejaban a los técnicos que se encargaran de determinar la forma de los medios destinados a usos con las máquinas. La tendencia actual consiste en fabricar la máquina para una herramienta previamente estudiada. Por esta razón es indispensable el conocimiento profundo de dicha herramienta. En la mayoría de los países industriales funcionan centros de investigación para estudiar el corte de metales, y algunos investigadores han realizado excelentes trabajos sobre el herramental. Se constituye un magnífico equipo de investigación, con ingenieros, investigadores y técnicos, y se estudian los fenómenos del corte de metales, no sólo con objeto de mejorar los útiles de corte, sino también para sacar de ellos el rendimiento máximo y que no tengan un desgaste excesivo.

Se da una importancia especial al estudio de los materiales para herramientas, así como a aspectos importantes de diseño y utilidad para su mejor rendimiento en la industria; en

cualquier maquinado siempre intervienen elementos diferentes, como es la pieza de trabajo que tiene el material al cual se le dará forma. La **herramienta cortante** es de un material fuerte y duro, apropiadamente formado, que aplica cargas al material de trabajo y desprende material. La **máquina-herramienta** es el dispositivo que fija el trabajo y las herramientas cortantes, y proporcionan los movimientos relativos correctos. Otro término usado es el de **herramental**, y se usa más libremente para describir en conjunto todos los útiles o dispositivos de trabajo, incluyendo las herramientas cortantes, así como el dispositivo de sostén de la pieza y los aditamentos especiales que se agregan a la máquina-herramienta básica para permitir su uso práctico. Las máquinas-herramientas en sí, son un dispositivo de soporte en las operaciones de corte.

Las herramientas de corte pueden fabricarse con una gran variedad de materiales, pero todas tienen una función idéntica: realizar el corte hasta su terminación, por lo que es deseable que tengan alta dureza y gran resistencia. Algunas herramientas tienen un solo filo o borde cortante, mientras que otras trabajan con múltiples filos.

2.1 HERRAMIENTAS DE CORTE PARA CENTROS DE MAQUINADO

Los materiales para herramientas siempre han tenido una parte importante en la economía mundial. En los principios de la historia, la piedra fue el material principal para la fabricación de herramental. En el siglo XIX, los indios americanos usaron el pedernal para hacer puntas de flecha, cabezas de lanza, navajas y otros tipos de medios con aristas cortantes. Incluso ahora, algunos pueblos primitivos usan la piedra como uno de los materiales principales para hacer herramientas. Durante la Edad del Bronce, las aleaciones de cobre tomaron el lugar de la piedra en las regiones más civilizadas.

Con el descubrimiento del hierro y del acero, se encontró un material para herramientas que se ha usado durante siglos, y ambos satisficieron la necesidad de materiales para herramientas que pueden operar a altas velocidades, después de la Revolución Industrial y el desarrollo de los métodos de producción a gran escala. Desde principios de siglo XX, se ha desarrollado un gran número de nuevos materiales para herramientas y la mayoría tienen ciertas características adecuadas para la manufactura actual. La resistencia a

temperaturas elevadas, es una característica importante, junto con otras.

Los requisitos que debe tener un material satisfactorio para herramientas cortantes son:

- Ser más duro y fuerte que el material que ha de cortar.
- Ser resistente a la abrasión para reducir el desgaste.
- Ser capaz de mantener las propiedades citadas en los dos puntos anteriores así como a las temperaturas a las cuales quedará expuesto cuando corte.

El último requisito ha tenido importancia en aumento durante los años recientes debido al desarrollo de materiales de trabajo con propiedades superiores para soportar altas temperaturas, y la necesidad de operar a velocidades de corte más altas para aumentar la producción. La diferencia principal entre los materiales para herramientas en uso común, es su capacidad para mantener la dureza y la resistencia a temperaturas elevadas.

A una herramienta de corte la caracterizan: el material del que está fabricada, su configuración, la calidad de su afilado, y las condiciones de corte seleccionadas, son aspectos que determinan el éxito de cada aplicación en que interviene la transformación de metales con desprendimiento de viruta. Las herramientas cortantes se fabrican de diversas formas, todas con el objeto de colocar el filo de corte en la posición adecuada, a fin de lograr un desprendimiento de material de la superficie a maquinarse. El perfil o forma del filo de corte puede variar para su adaptación a las diferentes condiciones de trabajo y a los distintos tipos de piezas. Las formas de la herramienta no sólo dependen del tipo de operación, sino que en el caso particular de la herramienta de desbaste, el perfil de la misma puede tener una influencia decisiva en la eficiencia. El perfil deseable es un compromiso entre la forma ideal y la que se debe adoptar para cumplir las exigencias prácticas.

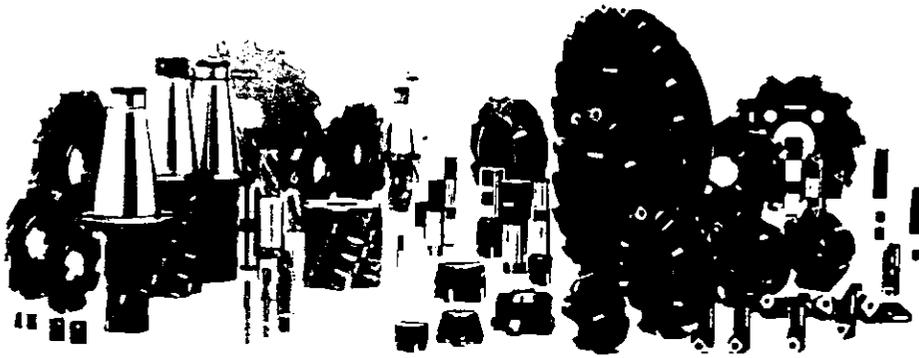


Fig. 2.1



Fig.2.2

En estas figuras 2.1. y 2.2. se indican una gran variedad de tipos y formas de herramientas para centros de maquinado (Revistas Stellram y Kennametal/Hertel)

2.2 CARBUROS PARA HERRAMIENTAS DE CORTE

Uno de los grupos más importantes de materiales de corte en uso es el de los carburos cementados. Los aceros de bajo carbono para herramientas de alta velocidad, dependen de la formación de carburos de metal para su dureza. En los aceros simples al carbono, es el carburo de hierro (cementita); en los aceros para corte rápido, sobre todo, es el carburo de cromo el que proporciona la dureza y la resistencia a la abrasión.

La mayoría de los carburos metálicos son en sí materiales extremadamente duros y tienen potencial como herramientas de corte. Los carburos de metal no se funden y moldean como los metales, y su único medio práctico de manufactura es por pulvimetalurgia. Dicho proceso consiste en pulverizar el material y compactarlo para darle forma; esto ocasiona que las partículas se pongan en contacto unas con otras en diferentes lugares, pero queda una porosidad en el material. Posteriormente se realiza el sinterizado, que es un tratamiento a temperatura elevada que provoca que las partículas del material se unan entre sí y reduzcan gradualmente el espacio de poros entre ellas, como se puede apreciar a continuación.

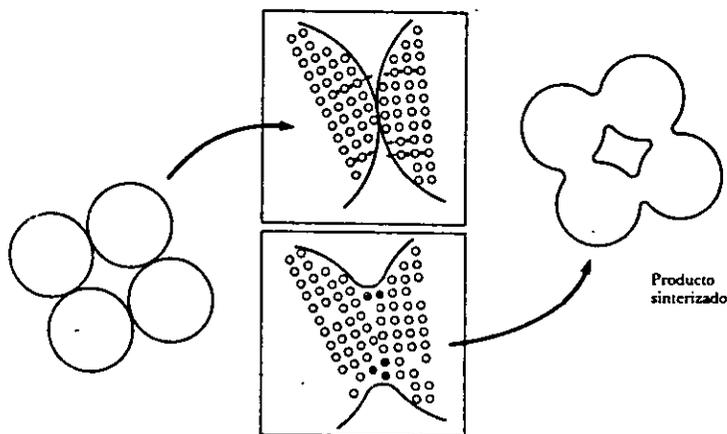


Fig. 2.3. Proceso de difusión durante el sinterizado y la metalurgia de polvos (Askeland).

Los carburos de metal puros pueden prensarse y sinterizarse, pero el material resultante es muy frágil. La mayoría de los carburos cementados, que por lo general se usan como materiales para herramientas de corte, contienen del 3% al 25% de cobalto o níquel como un agente aleante, para proporcionar una adecuada resistencia al impacto. En la siguiente figura (2.4) se puede observar como el cobalto líquido rodea cada una de las partículas sólidas de carburo de tungsteno (WC).

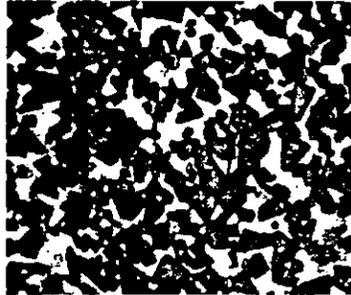


Fig. 2.4. Microestructura del carburo de tungsteno 20 % cobalto-carburo cementado (Metals Handbook vol.7.8A 1972).

Los carburos tienen un alto módulo de elasticidad, de 350 GPa (50×10^6 lb/in²) o más, en comparación con los 200 GPa (30×10^6 lb/in²) para el acero. La cualidad de rigidez indicada por este valor es importante en la aplicación donde se desea una deflexión mínima bajo carga. Los carburos cementados tienen altas cualidades de amortiguación, lo que les da un valor adicional en muchas operaciones de maquinado, donde la vibración puede ser de otra manera un problema. Las resistencias a la compresión varían de 3.5 GPa a 6 GPa (500 000 a 900 000 lb/in²). Los valores de dureza de los diferentes grados de material van aproximadamente de 65 a 90 HRC.

El carburo cementado se usó primero como material para herramientas cortantes antes de 1930. Los primeros útiles eran sólo de carburo de tungsteno y cobalto, y su uso estaba restringido a maquinar materiales no ferrosos y hierro fundido, debido a su falta de tenacidad y su tendencia a soldarse con el acero. Desde entonces han surgido variaciones de composición y tratamiento con amplios márgenes de dureza y propiedades de tenacidad, que son aplicables a la mayoría de las operaciones de maquinado.

Casi cualquier clase de herramienta puede hacerse de carburo sólido o con carburo

combinado con algunos metales, como una pequeña unión en una espiga de acero en el área de corte. La mayoría se usan en la actualidad como insertos fijados mecánicamente al portaherramienta, que se posicionan o se reemplazan con facilidad. Los carburos cementados, igual que los materiales de aleaciones no ferrosas, no pueden tratarse en caliente o maquinarse. El costo inicial de las herramientas de carburos cementados es de 2 a 10 veces el de las herramientas de acero rápido de diseño similar, no sólo por el costo más elevado del material, sino también por la mayor dificultad para conformar el mismo. El alto costo inicial, con frecuencia se recupera en corto tiempo debido a la más alta velocidad de operación y a la más larga duración del material.

La calidad de una herramienta de corte se puede caracterizar tomando en cuenta los siguientes puntos:

- Su capacidad para penetrar en el material a trabajar.
- Su resistencia a la abrasión producida durante el corte.
- Su resistencia a la compresión a altas temperaturas.
- Su capacidad para mantener condiciones óptimas de corte.
- Material del que esté fabricada.

El corte de materiales implica una gran deformación plástica en la punta de la herramienta, gran temperatura y severa fricción en las interfaces de la misma, y en rebaba de la pieza de trabajo. La mayor parte de la deformación plástica y la fricción se manifiesta en forma de calor, alcanzando temperaturas mayores a los 1000 °C, por lo que aproximadamente un 80% se desprende en la rebaba, y lo restante permanece en el filo o la punta de la herramienta. El esfuerzo en la punta de la herramienta es alto, y los esfuerzos dependen de la pieza de trabajo y de las condiciones de maquinado. La herramienta puede experimentar repetidos impactos durante cortes interrumpidos, debidos a impurezas contenidas en el material de la pieza, así como vibraciones de la máquina. La rebaba desprendida en el momento puede presentar interacción química con el material de fabricación de la herramienta. Por lo tanto, está sujeta a una variedad de condiciones hostiles. Por estos motivos pueden existir los siguientes problemas:

- Desgaste por abrasión.
- Muescado.

- Fatiga térmica.
- Cráteres formados por desgaste.
- Bordes acumulados.

De lo anterior surge la necesidad de encontrar materiales cada vez más fuertes, tenaces, resistentes a la abrasión y con capacidad de corte. A continuación se mencionan herramientas hechas a base de carburos, así como su proceso de fabricación.

Proceso de pulvimetalurgia.

El proceso de pulvimetalurgia como se definió anteriormente, origina una muy fina microestructura y proporciona una distribución uniforme de carburos e inclusiones no metálicas. Mediante este proceso se ha encontrado una gran tenacidad en los materiales, control dimensional durante tratamientos térmicos, facilidad de afilado, y desempeño al corte bajo condiciones difíciles, donde la buena tenacidad es esencial.

Carburos cementados.

Los carburos cementados están constituidos por materiales refractarios, en los cuales las partículas duras de carburo están unidas o cementadas por un material de unión blando y dúctil. El primer carburo cementado fue elaborado con carburo de tungsteno y cobalto.

Estos carburos se manufacturan por medio de pulvimetalurgia, la cual consiste en una secuencia de pasos, los cuales se deben controlar cuidadosamente, a fin de obtener el producto final con la microestructura y desempeño deseado. Se tienen los siguientes:

- Procesos del mineral y preparación de los polvos de carburo de tungsteno.
- Preparación de otros polvos de carburo.
- Producción de grados (tipos) de polvos.
- Compactación de los polvos.
- Sinterizado.
- Post-sinterizado.

Características:

- Las velocidades de corte son de 4 a 6 veces más altas que las de aceros rápidos.
- Conservan buena dureza aun a temperaturas que oscilan alrededor de 1100 °C.
- Obtención de pastillas o insertos de carburo a base de sinterizado.
- La forma y filo se pueden obtener durante el sinterizado o mediante afilado.

- Para la fundición gris y la mayoría de los metales, excepto los aceros, las herramientas están compuestas de carburo de tungsteno con adición de carburo de titanio y tantalio.
- La dureza es del orden de 80 HRc.

Preparación del carburo de tungsteno.

Los polvos de carburo de tungsteno pueden ser producidos por dos procesos. Tradicionalmente el mineral de tungsteno y los óxidos de tungsteno son procesados con amonio. Estos componentes se rebajan en hidrógeno, para el polvo metálico. Los polvos finos del tungsteno son mezclados con carbono y luego sometidos a una atmósfera de hidrógeno que oscila entre 1400 °C y 1500 °C para producir partículas de carburo de tungsteno de tamaño entre 0.5 a 30 micras. Cada partícula está compuesta por numerosos cristales de carburo de tungsteno, y pequeñas partículas de tantalio, cromo o vanadio son adheridas algunas veces antes de la carburización, a los polvos de tungsteno y carbono, para producir polvos más finos.

El desarrollo más reciente es un proceso en el cual el carburo de tungsteno es producido en forma de cristales mediante la reducción directa del mineral de tungsteno, el cual se mezcla con óxido de hierro, carbono y carburo de calcio. A alta temperatura se produce una reacción exotérmica alrededor de 2500 °C, la cual produce una masa derretida que al ser enfriada contiene cristales de carburo de tungsteno dispersos en el hierro, y la escoria contiene las impurezas. Los cristales de carburo de tungsteno se separan de la matriz de hierro.

Microestructura y composición de los carburos cementados.

Las propiedades del carburo cementado dependen no sólo del tipo de carburo, sino también del tamaño del grano y del porcentaje de material de unión. A lo anterior se debe el desempeño de la herramienta de carburo. Por ejemplo, los carburos de tungsteno y molibdeno tienen microestructura de cristales hexagonales, mientras que los carburos de zirconio, tantalio, vanadio, niobio, molibdeno, titanio y hafnio, tienen microestructura cúbica.

Carburos de tungsteno-titanio-tantalio-niobio.

Estos óxidos se emplean en el maquinado de acero para resistir el desgaste y la acción química. Son mezclados con polvos metálicos de tungsteno y carbono. La mezcla se

calienta en una atmósfera de hidrógeno al vacío, para producir los óxidos y formar una solución sólida de carburo. El método, que puede servir para producir carburo de tungsteno y carburo de titanio WC-TiC en solución sólida, se llama método de Mestruum. En este procedimiento los carburos son disueltos individualmente en níquel líquido, precipitándose posteriormente la solución durante el enfriamiento.

Herramientas de carburo revestidas.

Hasta ahora uno de los mayores retos en el diseño de las herramientas de carburo cementado, es la optimización de la dureza asociada directamente con las aleaciones de WC-Co, con una resistencia superior a la de aleaciones de carburo que contienen altos niveles de carburo de titanio. Esto ha permitido el desarrollo de herramientas de carburo revestidas. Los carburos revestidos son los que más se producen y se venden en Estados Unidos, en toda la línea de insertos de materiales de corte. Los carburos revestidos tienen un gran éxito, debido a que mejoran en un factor de 2 o 3 la duración de la herramienta en aceros y hierros.

Herramientas recubiertas con aleaciones de cobalto.

Estos útiles fueron una gran revelación entre el abismo que separa los aceros de alta velocidad, de los aceros de carburo, que aunque son compatibles en su dureza, pueden ser empleados a más altas temperaturas y velocidades de corte. En los aceros de alta velocidad, para obtener su dureza, se tratan térmicamente, mientras que los recubrimientos de cobalto no lo requieren

Proceso del recubrimiento con aleaciones de cobalto.

Un **recubrimiento** es una técnica de soldadura o unión por el cual un material duro o resistente a la corrosión es depositado en la superficie de un segundo material produciendo un compuesto laminar, **existen dos tipos** de recubrimientos que son: el llamado Surfacing que es el descrito anteriormente y el denominado Sizing que consiste en recubrir un polímero con un material orgánico para mejorar la unión y la resistencia a la humedad en el polímero. El primer recubrimiento es realizado por electricidad o fundición inducida en una atmósfera protectora, y para herramientas de corte se les procesa por medio de moldes permanentes de grafito.

El recubrimiento con aleaciones de cobalto se basa en una fase primaria de una solución

sólida de cobalto enriquecido por cromo y tungsteno. Tal disposición fuerte y compleja (recubrimiento), tiene muy efectiva dureza y es muy útil como refractario.

Características:

- Resistencia regular a la abrasión.
- Tenacidad adecuada.
- Dureza a temperatura elevada.
- Capacidad efectiva para cortes de desbaste.

Se deben considerar los siguientes puntos en el uso de los recubrimientos de cobalto.

- Cuando la producción deseada es alta, y hay que compararla con la utilización de otros tipos de herramientas.
- Cuando la velocidad es baja en la cara de corte (superficie en la cual se apoyan las virutas durante el maquinado).
- Cuando la rigidez de los dispositivos de sujeción de la máquina no es suficiente para soportar efectivamente un carburo cementado.
- En el caso de diversas operaciones en las cuales las velocidades de una o más de ellas, son mayores que la recomendada para carburos o aceros de alta velocidad.
- Para maquinados de superficies rugosas, en los que las superficies contienen impurezas abrasivas tales como arena residual, superficies oxidadas, escoria y partículas refractarias alojadas en el material de la pieza.

Aleaciones de carburo de tungsteno y cobalto.

El carburo de tungsteno unido a cobalto ofrece gran resistencia a la abrasión, y por lo tanto, tiene una gran cantidad de aplicaciones en materiales destinados para corte.

Cerments.

Los cerments son polvos productos de la metalurgia, los cuales consisten en partículas cerámicas unidas a metálicas. El componente cerámico proporciona resistencia a la oxidación y alta dureza, mientras que el componente metálico incrementa la ductilidad y resistencia a choques térmicos. La unión de componentes cerámicos con metales es un proceso complejo, el cual depende ampliamente de las propiedades de solubilidad en la fase

líquida y la relación de fase de los materiales seleccionados.

Cerments de carburo de titanio.

Su aceptación fue limitada por su baja resistencia y alta fragilidad. Pero hubo interés en el carburo de titanio continuo, sobre todo por el bajo costo y la disponibilidad del óxido de titanio. Así mismo, la gran dureza, punto de fusión y resistencia a la oxidación del carburo de titanio, comparados con las del carburo de tungsteno ofrecen un gran potencial.

El carburo de titanio con níquel tiene una deficiente compatibilidad química, pero ello fue mejorado notablemente con la adición de molibdeno o carburo de molibdeno. El centro del carburo consiste en carburo de titanio en fase alfa 1, mientras que el entorno es enriquecido con molibdeno en fase alfa 2. La resistencia a la abrasión de cada compuesto varía de acuerdo con la temperatura de sinterización.

Cerments con base de carbonitruros metálicos.

El desarrollo de cerments continúa con la introducción de carbonitruros metálicos: carbono-titanio-molibdeno y componentes de nitrógeno, en uniones metálicas, que preferentemente consisten en níquel, molibdeno, cobalto o una combinación de ellos. Agregar nitrógeno en la fase sólida produce dureza y reduce la deformación plástica en el filo.

Adicionar cobalto en la fase de unión y tantalio y/o niobio en la fase sólida de un carbonitruro metálico complejo, puede mejorar el desempeño de corte de los cerments.

Propiedades y grado de selección.

Los fabricantes de materiales para herramientas de corte manejan las propiedades de sus componentes como propias. La comercialización cae dentro de dos categorías: cerments basados en carbonitruro de titanio, y cerments con base de carburo de titanio.

Comparación de cerments con carburos cementados.

Los cerments de carburo y carbonitruro de titanio son más resistentes que los carburos cementados y permiten trabajar a más altas velocidades de corte, que los carburos de tungsteno o los carburos revestidos. La dureza del carbonitruro de titanio cementado es similar a la de carburos cementados. La influencia de la temperatura sobre la dureza lleva a propiedades similares por el sistema de unión y volumen del metal.

La resistencia y el intervalo de dureza de los carburos cementados son mayores que las del

carbónitruro de titanio cementado, en una proporción del 15% al 20 %. Por otro lado, el uso de estos cerments se limita en aplicaciones de trabajos pesados, así como el empleo de refrigerantes durante su aplicación, debido a su baja resistencia al choque térmico.

Las herramientas de cerments son propias para el maquinado de acero fundido, hierro fundido, y el detallado de aleaciones no ferrosas que no requieren maquinado. Este tipo de herramientas son óptimas para operar a mayores velocidades de corte que los carburos revestidos o cementados. obteniéndose mejores acabados superficiales. Una de las principales finalidades en la selección del uso de cerments es su larga duración, aun trabajando a una gran variedad de velocidades de corte.

2.3 GEOMETRÍA DE LAS HERRAMIENTAS

Las herramientas cortantes se usan en un gran número de formas y tipos. Algunas son de un solo filo (una sola arista cortante) y aun en el tipo más simple, existe gran variedad de formas. Otras son de filos múltiples, con la mayoría de las aristas cortantes relacionadas una con otra.

Aunque cualquier forma de arista de corte producirá viruta, ciertas formas son necesarias para producir determinadas superficies. En cualquier caso, algunas configuraciones de herramientas permiten la eliminación más eficiente del metal que otras. Por tanto, existen reglas generales para el diseño de los filos de herramientas cortantes. La superficie que se muestra a continuación (fig. 2.5) puede producirse por distintas herramientas. Si la alimentación fuera suficientemente pequeña, la superficie final estaría determinada sólo por la dirección del movimiento de alimentación. En alimentaciones más grandes, la forma del filo del útil de corte tendrá un efecto directo en los elementos que forman la superficie, y el grado de conformidad con la superficie deseada puede variarse por el cambio en la forma del filo para la alimentación. El contorno del filo debe ser el que más eficientemente produzca la superficie deseada.

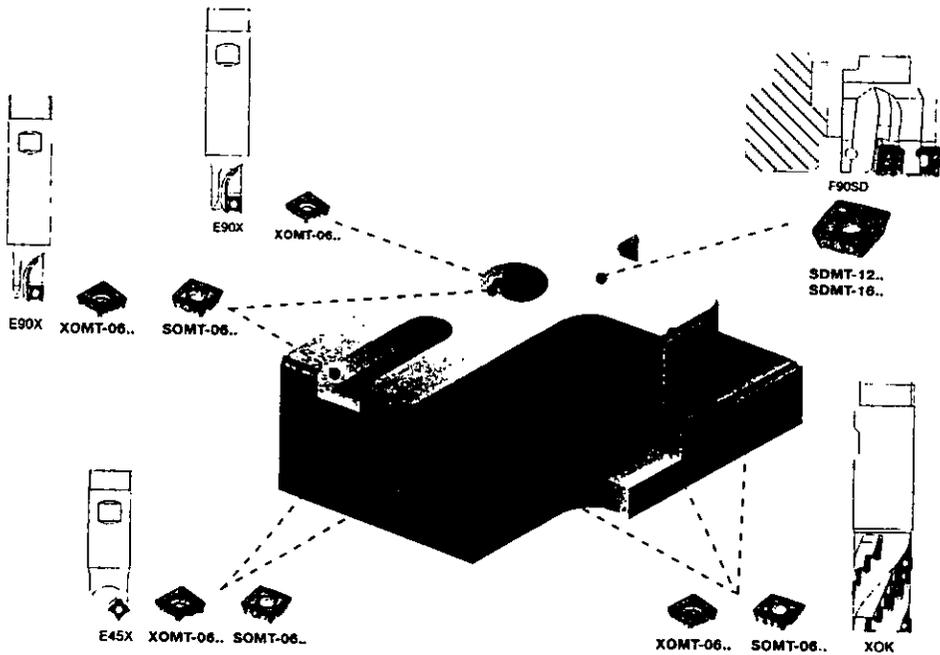


Fig. 2.5. Superficie maquinada con diversas herramientas (Revista Heliquad).

La forma del filo afecta el acabado. La herramienta que se ilustra en la figura anterior tiene un radio definido de punta, y con alimentación finita, puede usarse para producir una superficie relativamente plana. Aunque algunas veces se necesitan puntas agudas en las herramientas a fin de producir esquinas definidas, y se deben evitar siempre que sea posible.

Se dañan con facilidad debido a las presiones del corte y tienden a desgastarse rápidamente. Además, el calor no puede conducirse desde el área de corte correctamente, debido a la masa pequeña de la herramienta cercana al trabajo. Un contacto demasiado largo entre la arista cortante y el trabajo puede causar que ocurra vibración por las fuerzas de flexión excesivas de la herramienta o el trabajo. Las superficies del útil de corte afectan la formación de la viruta. La forma y posición de las superficies de la herramienta influyen en el flujo de la viruta, y la capacidad de la herramienta para hacer

contacto adecuado, así como la duración al desgaste de la misma.

Nomenclatura de herramientas. Debe enfatizarse que la nomenclatura presentada a continuación se aplica a cualquier herramienta cortante. Esto se debe a que en cualquier caso existirá para referencia principal, una dirección del movimiento de corte. En algunos casos, la acción cortante se obtiene por rotación de la herramienta en el trabajo, y la dirección del corte debe definirse como la dirección tangente a la trayectoria de la herramienta o en el trabajo en el punto del corte.

Se emplean las siguientes definiciones.

Cara: superficie de la herramienta en la cual incide la viruta, a medida que se produce el maquinado.

Nariz: porción de la arista de corte que une a las aristas cortantes del lado y extremo. La nariz puede ser un punto, un arco o un chaflán.

Flanco: superficie de la herramienta que corta a la cara para formar la arista de corte de la herramienta.

Extremo de la arista de corte: arista secundaria de corte de la herramienta.

Lado de la arista de corte: arista principal de corte de la herramienta, usualmente casi normal a la dirección y a la alimentación.

Filo de corte frontal: Es el filo que se localiza en el extremo de la herramienta. En las herramientas de corte de filo lateral, el filo de corte frontal puede emplearse para ligeras pasadas de refrentado. Estas herramientas y las diseñadas inicialmente para cortar con la arista frontal, se llaman herramientas con filo de corte frontal.

Filo de corte lateral: Es el filo de corte localizado en el borde de la herramienta. Existen herramientas que efectúan la mayor parte del trabajo de corte con esta arista, por lo que debido a ello, se denominan herramientas de filo de corte lateral.

Radio de la punta: La punta es una parte muy crítica del filo de corte, puesto que proporciona a la pieza el acabado superficial. Si la punta tiene forma aguda, el acabado superficial resultará normalmente inaceptable y la duración de la herramienta será breve. Por ello se requiere de un radio en la punta para obtener un buen acabado superficial, así como una mayor duración de la herramienta. El acabado superficial está determinado por el valor del avance y el radio de la punta, además de considerar otros factores, como material

de la pieza, velocidad de corte y fluido para corte. Un radio grande en la punta, proporcionará un buen acabado superficial y permitirá el empleo de un mayor avance.

Ángulo del lado de arista cortante: ángulo entre el lado de arista cortante de la herramienta y un plano perpendicular a la dirección de alimentación.

Ángulo del extremo de la arista cortante: ángulo entre el extremo de la arista de corte de la herramienta y la dirección de alimentación.

Ángulo lateral de inclinación: ángulo de inclinación medido en un plano paralelo a la dirección de la alimentación.

Ángulo trasero de inclinación: ángulo de inclinación medido en un plano perpendicular a la dirección de la alimentación.

Ángulo de inclinación: ángulo entre la cara de la herramienta y un plano perpendicular a la dirección de corte.

Ángulo de alivio: ángulo entre el flanco de la herramienta y la dirección del movimiento cortante.

Ángulo lateral de alivio: ángulo medido en un plano paralelo a la dirección de alimentación.

Ángulo de claro: ángulo de alivio en el flanco de la herramienta; por lo general no está presente, pero es necesario para evitar la interferencia de algunos cortadores rotatorios o piezas de trabajo, o bien para simplificar el reafilado. El claro puede ser de lado o de extremo.

En el capítulo siguiente profundizaremos más en referencia a los ángulos de corte.

2.4 ÁNGULOS DE CORTE

Un aspecto muy importante que se debe tener presente en la creación de herramientas cortantes, son los ángulos, que a continuación se mencionan:

Ángulo de inclinación: Al maquinar, los ensayos han confirmado que cuando el ángulo de inclinación según el cual se deslizan las virutas, llamado ángulo de inclinación real, se hace mayor en la dirección positiva, disminuye el esfuerzo de corte y la temperatura de corte. La duración de la herramienta también aumenta cuando se

incrementa el ángulo de inclinación real hasta un valor óptimo, después del cual vuelve a disminuir.

Ángulo de desprendimiento: También se denomina ángulo de incidencia. El ángulo de desprendimiento frontal y el ángulo de desprendimiento lateral, en las herramientas de una sola punta, suelen ser iguales, aunque no siempre sea éste el caso. El ángulo de desprendimiento por debajo de la punta de la herramienta es una combinación de los ángulos de desprendimiento frontal y lateral. La magnitud de los ángulos de desprendimiento tiene un importante efecto en la eficacia de la herramienta. Si los ángulos son demasiado grandes y el filo de corte se debilita, se corre el peligro de ruptura, si las pasadas son demasiado fuertes en un material duro y tenaz. En las pasadas de acabado se produce un rápido desgaste del filo de corte, que puede originar problemas con el control de medida de la pieza. Los ángulos de desprendimiento que sean demasiado pequeños hacen aumentar el desgaste de los laterales por debajo del filo de corte, lo que reduce de forma significativa la duración de la herramienta. Los ángulos de desprendimientos mayores, tienden por lo general a producir mejores acabados superficiales de la pieza, como consecuencia de que la superficie de roce entre herramienta y pieza es menor. Por esta razón, las herramientas de roscar con una sola punta, se deben dotar de ángulos de desprendimiento que sean tan grandes como sea posible.

Ángulo de posicionamiento complementario de la arista principal y ángulos de ataque: Estos ángulos se consideran conjuntamente, puesto que el ángulo de posicionamiento complementario de la arista principal está normalmente proyectado para proporcionar el ángulo adecuado de ataque, cuando la herramienta está en funcionamiento. El ángulo de posición complementario de la arista principal, y el ángulo de ataque, coinciden cuando el mango de la herramienta está situado perpendicularmente al eje de la pieza. Cuando el mango no es perpendicular, el ángulo de ataque es determinado por la posición de la arista principal y la línea imaginaria que es perpendicular a la dirección del avance. El flujo de las virutas sobre la cara de corte resulta

aproximadamente perpendicular a la arista de corte lateral, excepto cuando se efectúan pasadas de poca profundidad. El espesor de la viruta sin deformar, se mide perpendicularmente al filo de corte lateral. A medida que aumenta el ángulo de ataque, lo hace la longitud de la viruta en contacto con el filo de corte, y la viruta se hace más larga y más delgada. Este efecto es el mismo que cuando se aumenta la profundidad de corte o se disminuye el avance, aunque actuando sobre el ángulo de ataque se mantienen la profundidad de corte y el avance, obteniéndose también la misma cantidad de viruta. El efecto de alargar la viruta y disminuir su espesor por medio del aumento del ángulo de ataque, resulta muy conveniente puesto que se incrementa la duración de la herramienta para una velocidad de corte dada.

Ángulo de salida: El ángulo de salida o ángulo de posicionamiento de la arista secundaria, es importante cuando se produce el desgaste de la herramienta por efecto de la craterización. Frecuentemente, el cráter se alarga hasta romperse a través del filo de corte secundario, justo detrás de la punta, produciéndose la fractura de la herramienta en poco tiempo. El reducir el ángulo de salida tiende a alargar el tiempo en que se produce la fractura por craterización.

2.5 TIPOS DE HERRAMIENTAS DE CORTE.

Formas o perfiles de la herramienta: Los términos y definiciones que se refieren a las herramientas de corte de una sola punta pueden variar según el fabricante; existen muchas formas para satisfacer varios requisitos. Las formas comunes de herramientas utilizadas para torneado, refrentado, limado, cepillado y taladrado se muestran a continuación. Estas son sólo algunas de las muchas variedades, y suelen ser de empleo general.



Fig. 2.6. Diversas herramientas y procesos de fabricación (Revista Iscar/New Line México).

Características de los tipos de herramientas de corte.

Herramienta de una sola punta: El término se aplica a las herramientas para torneado, cepillado, mandrinado, etc., que tienen un solo filo de corte principal en un solo extremo. Dicho filo puede estar formado en el extremo de una barra sólida de acero, o bien la parte activa de la herramienta puede estar constituida por un inserto o plaquita que se fija al cuerpo de la herramienta por medio de soldadura con latón, u otros tipos de soldaduras, o bien por procedimientos mecánicos.

Herramienta de corte frontal: El filo de corte principal está en el extremo de la parte cortante o activa de la herramienta. Este filo puede ser perpendicular al eje de la herramienta, o bien formar un determinado ángulo.

Herramienta de corte lateral: Tiene su filo principal en uno de los lados de la zona de corte de la herramienta. El filo principal puede ser paralelo al eje de ésta o formar un cierto ángulo.

Herramienta de corte curvo: El ángulo de entrada es continuamente variable. El filo de corte normalmente tiene la forma de una curva suave o continua, a lo largo de toda su longitud o una gran parte de ella.

Herramienta neutra: Es una herramienta que puede cortar de derecha a izquierda o viceversa, pudiendo también efectuarse el corte paralelamente al eje del mango.

Herramienta derecha: Tiene su filo de corte principal en el lado derecho. Como es normal en el torno, el avance de la herramienta hacia la pieza se produce de derecha a izquierda cuando se observa desde el extremo del mango.

Herramienta izquierda: Tiene su filo de corte principal en el lado izquierdo. Como es común en el torno, el avance de la herramienta hacia la pieza se produce de izquierda hacia la derecha cuando se observa desde el extremo del mango.

- 1) Herramienta para torneado y refrentado.
- 2) Herramienta para perfilado.
- 3) Herramienta para tronchado.
- 4) Herramienta para ranurado y radios.
- 5) Herramienta para roscado.

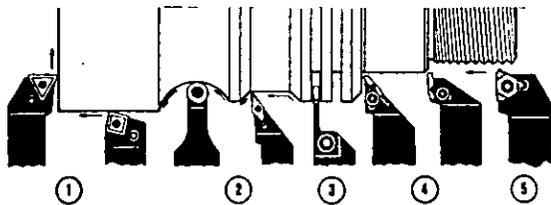


Fig. 2.7. Los diversos tipos de herramientas para un proceso de fabricación (Sandvik Turning).

3. MAQUINABILIDAD

Introducción.

El maquinado es, en el mejor de los casos, un procedimiento costoso cuando se compara en términos generales con la mayoría de otros procesos de manufactura. Cuando se usa para hacer sólo una o pocas piezas, la mayor parte del costo proviene de la habilidad en la operación y el ajuste. El tiempo real de corte puede ser un pequeño porcentaje del tiempo total requerido. Según estas condiciones, la vida de la herramienta es de importancia relativamente pequeña, y los aceros rápidos para herramienta se usan predominantemente debido a su menor costo inicial y a la facilidad para darles forma y esmerilarlos. Pueden usarse bajas velocidades de corte sin aumentar el costo de la parte terminada. Sin embargo, en operaciones de producción la habilitación de una máquina llega a ser permanente o semipermanente, y la mayor parte del tiempo de manufactura con frecuencia es el tiempo real de corte. En estas condiciones, el costo final de la pieza está influenciado más directamente por la velocidad de corte, lo cual en casi todos los casos tiene una relación directa con la vida o duración de la herramienta.

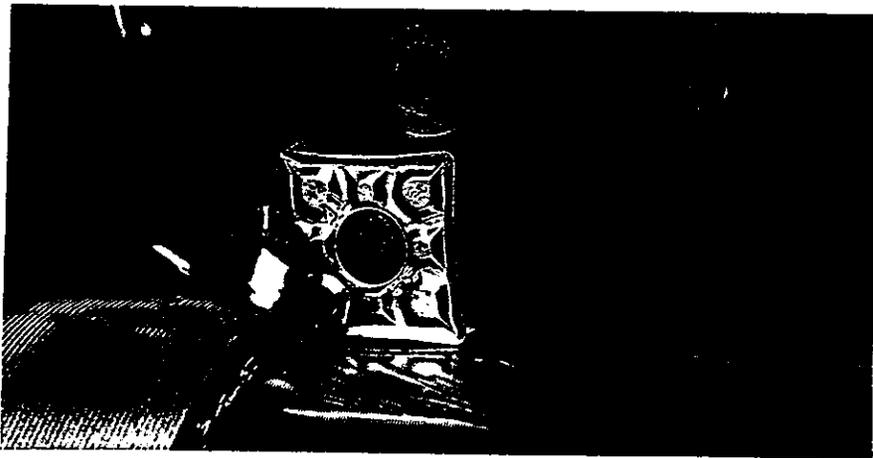


Fig.3.1. Proceso de maquinado (Revista Iscar New Line 1997)

Antes de 1900, el maquinado era principalmente al estilo de cuarto de herramientas; pero con el desarrollo de la producción en gran escala de artículos de consumo que tienen superficies maquinadas, la demanda para corte más económico se incrementó.

En la mayoría de los casos, la economía mayor depende no sólo de la elección apropiada y el control de muchos otros factores. La complejidad del problema y la dificultad de determinar las condiciones óptimas, se hacen evidentes cuando se observa que todas las siguientes variables han mostrado que tienen efecto significativo en la duración o la vida de la herramienta, en el acabado del trabajo, y en la exactitud como a continuación se puede observar en la tabla siguiente.

Tabla 3.1 Variables que afectan las elecciones de maquinaria		
Variables del trabajo	Variables de la herramienta	Condiciones del corte
Composición	Composición	Velocidad del corte
Microestructura	Rigidez del montaje	Alimentación
Dureza	Angulo del lado de la arista	Profundidad del corte
Tamaño	Angulo del extremo de la arista	Material refrigerante
Forma	Forma de la punta	Aplicación del refrigerante
Condición de la superficie	Angulo de inclinación	Condiciones de impacto
Temperatura	Angulos de alivio	Rigidez de la máquina
	Filo de la arista cortante	Movimiento del corte
	Acabado de la superficie	Movimiento de la alimentación
	Diseño del rompevirutas	Eliminación de la viruta

Algunas de estas variables se determinan por los requisitos de la operación particular. El trabajo puede tener algún tamaño fijo; forma y composición sobre las cuales no hay control; la geometría de la herramienta puede limitarse por el tipo de cortador, y la alimentación y profundidad de corte con frecuencia se determinan por el acabado requerido o por la cantidad de material que se debe eliminar. Muchos de los factores son importantes debido a que afectan la cantidad y el tipo de vibración que ocurre. Uno de los más importantes de aquéllos, el cual siempre tiene un gran efecto y sobre el cual usualmente hay cierto control, es la velocidad de corte.

3.1 MAQUINABILIDAD DE LOS MATERIALES

Casi todo mundo ha usado en cierta ocasión una navaja de bolsillo para tallar alguna forma en madera. Aunque tal operación no cumple con todas las condiciones de una definición de maquinado es, sin embargo, una operación de formación de viruta que usa una herramienta fuerte y dura para causar el desprendimiento localizado en una pieza de trabajo. El tallador indudablemente ha notado también que algunas maderas son más fáciles de conformar que otras. Se enfrenta a una diferencia inherente en la facilidad de tallado de diferentes clases de madera. Esta facilidad de trabajo es afectada

no sólo por la clase de madera, sino también por el contenido de humedad y el estado de desflechado.

Una consideración similar surge en el maquinado de los metales. Los distintos metales pueden cortarse según relaciones distintos, se requieren distintos valores de potencia y se obtienen diferentes acabados. Estas diferencias dependen no sólo de la clase de metal o aleación, sino de su historia previa al proceso, incluyendo la deformación y las operaciones de tratamiento térmico que afectan su dureza resistencia y estructura de grano.

El término **maquinabilidad** se usa para describir la facilidad relativa con la cual puede maquinarse cualquier material. En cierto aspecto, el término se parece a la palabra resistencia; un material puede tener resistencia a la tensión, resistencia al corte, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga y resistencia a la compresión, todas las cuales se miden en diversas formas y cualquiera de ellas no necesariamente se correlaciona con las otras. Esto es, materiales que tienen resistencias iguales a la tensión no siempre tienen la misma resistencia al impacto o a la fatiga. En la facilidad de maquinado pueden considerarse tres conceptos: acabado, consumo de potencia y vida de herramienta. A diferencia de las mediciones en las propiedades de resistencia, estas medidas no siempre proporcionan información numérica precisa, sino que con frecuencia se relacionan más a algún estándar.

Este término de maquinabilidad se aplica comúnmente a los materiales de trabajo para determinar sus propiedades de respectivas; puede tener varios significados según el proceso considerado. Cuando se establece que cierto material, llamémosle X, es más mecanizable que otro material llamado Y, esto puede significar que se obtiene un menor desgaste de la herramienta por unidad de tiempo con el material X, o que se obtiene un mejor acabado superficial con este mismo material, o bien que se requiere menos potencia para mecanizarlo. Es claro que en procesos de acabado, el desgaste de la herramienta y el acabado superficial son los parámetros más importantes en operaciones de desbaste. El desgaste de la herramienta y el consumo de potencia son aspectos importantes.

Se debe recalcar que cualquier declaración con respecto a la maquinabilidad, puede aplicarse únicamente bajo el conjunto particular de circunstancias existentes cuando se hizo la observación. Por ejemplo, según un conjunto de condiciones dadas puede

obtenerse un mejor acabado superficial con el material X que con el material Y ; sin embargo, bajo otro conjunto de condiciones, con una herramienta de material diferente la situación puede invertirse. Un comportamiento similar puede ocurrir con los otros criterios de maquinabilidad, el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo y el consumo de potencia. Para complicar aún más la situación, si se ordena un cierto grupo de materiales de acuerdo con su maquinabilidad según el criterio de desgaste de la herramienta, éstos pueden ser ordenados en forma diferente si se utilizan los criterios de acabado superficial o de consumo de potencia. Por lo tanto el término maquinabilidad tiene poco significado, excepto en un sentido cualitativamente amplio.

Se han realizado muchos intentos para obtener una medida cuantitativa de la maquinabilidad (un índice de maquinabilidad). Sería muy útil un método para obtener tal índice, si los resultados fuesen significativos, particularmente para los productores de acero, que deben realizar algún tipo de prueba para verificar las propiedades de maquinado o mecanización de sus productos. En razón de la necesidad de una mayor productividad, los usuarios de metales se interesan cada vez más en las propiedades de mecanización de sus materiales de trabajo y, por supuesto, apreciarán un método rápido y confiable para verificar esa propiedad. Se ha propuesto una gran variedad de métodos ingeniosos para obtener datos acerca de la maquinabilidad y algunos de ellos aún son utilizados. Aunque tales métodos no son del todo confiables, pueden servir para medir la variación en alguna propiedad de mecanización de materiales de la misma especificación. Sería muy difícil probar que los resultados de tales ensayos producen información cuantitativa de interés práctico acerca de las propiedades de maquinado; sin embargo, la experiencia ha demostrado que estos resultados sirven como guía para el estudio de dichas propiedades.

3.2 MAQUINABILIDAD DE METALES AFECTADA POR DIVERSOS FACTORES

Una dureza elevada implica una baja maquinabilidad debido al alto consumo de potencia y al incremento de temperatura, y por consiguiente, el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo será alto. Sin embargo muchos otros factores

afectan la maquinabilidad. y también puede afirmarse que, en general, los metales puros tienden a adherirse a las superficies de trabajo de la herramienta de corte, dando lugar a la presencia de la fricción y desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Por ejemplo, cuando se mecaniza hierro puro, las fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta son muy elevados, casi tanto como los valores que se obtienen al mecanizar aceros aleados muy tenaces.

La adición deliberada de azufre, plomo o telurio tanto a los metales no ferrosos como a los aceros, aumenta la productividad y mejora el acabado superficial, pero no se aclara completamente el mecanismo de trabajo de estos aditivos. Al parecer, los aditivos mencionados reducen el contacto metálico entre la herramienta y el material de trabajo; en consecuencia reducen la fricción y el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Estos constituyentes no afectan grandemente las propiedades mecánicas del metal base a la temperatura ambiente, pero a temperaturas elevadas dichas propiedades pueden ser afectadas notablemente. El efecto del azufre, el plomo o el telurio sobre las propiedades de los metales a temperaturas elevadas, limita el uso de estos metales, denominados de alta maquinabilidad; pero a pesar de ello, en la práctica tienen una gran aplicación y su demanda es elevada. La falta de una teoría sobre el efecto del material de la pieza en el desgaste de la herramienta dificulta la labor de los ingenieros y metalurgistas involucrados en la producción. Por ejemplo, con la automatización creciente de los procesos de mecanizado es necesario mantener características consistentes del desgaste de las herramientas, pero es claro que ocurren grandes diferencias en el desgaste, aun para herramientas de la misma especificación. Estas diferencias, por lo general, no están relacionadas con las propiedades del material que se miden normalmente.

Surge una serie de dificultades particulares para mecanizar los metales desarrollados para aplicaciones a temperaturas elevadas, como los metales utilizados en la fabricación de turbinas térmicas. Usualmente no es posible agregar elementos de alta maquinabilidad a estos metales, y por lo tanto se deja la solución de estos problemas de mecanización a los ingenieros de herramientas y de producción. Debido a la dificultad que ocasionan dichos problemas, se ha recurrido a otras técnicas de mecanización o maquinado, tales como el mecanizado electroquímico, que es más económico.

3.3 ENSAYOS DE MAQUINABILIDAD

Estas pruebas consumen necesariamente una gran cantidad de material de trabajo y varias herramientas experimentales. La recopilación de datos sobre desgaste de herramientas, tales como los que se ilustran en la gráfica de la Figura 3.2, es altamente tediosa e involucra una serie de mediciones tomadas cuidadosamente durante largos periodos de tiempo.

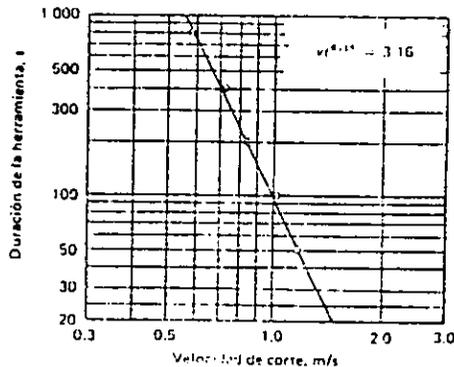


Fig.3.2. Relación típica entre la duración de la herramienta, y la velocidad de corte (L.E. Doyle 1988).

Los aditivos e inclusiones en los materiales comerciales pueden variar a causa de la segregación, de tal modo que se pueden presentar discrepancias considerables en el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo, entre el interior y exterior de la muestra, pudiendo también ocurrir a lo largo de la misma. En los materiales para herramientas de igual especificación nominal, también pueden ocurrir considerables variaciones. Se sabe que en las herramientas de carburo se pueden presentar variaciones en la resistencia al desgaste, en pastillas colocadas en el mismo horno durante el proceso de sinterización. Con los aceros rápidos para herramientas, el problema es más grave aún, porque las temperaturas de templado son excesivamente críticas, y la más pequeña variación en las condiciones del tratamiento térmico conduce a una gran variación en el comportamiento de la herramienta.

Debido a las razones antes mencionadas, los ensayos extensivos de desgaste de herramienta a menudo pueden conducir a resultados erróneos, porque las propiedades de los materiales tanto de las herramientas como las del trabajo pueden variar durante la serie de ensayos o pruebas.

Uno de los métodos de ensayo rápido es el conocido como ensayo de desgaste acelerado, y un ejemplo de este tipo de prueba involucra el refrentado en el torno. En este ensayo, la velocidad de rotación de la pieza es elevada, y la herramienta se desplaza radialmente desde el eje de la pieza hacia afuera. Las condiciones se escogen de tal modo que la herramienta falle totalmente antes de alcanzar el diámetro exterior de la pieza. La distancia radial de mecanizado se considera como una medida de las características de mecanización del conjunto herramienta-pieza que se usa en el ensayo. Aunque este método es útil como un ensayo comparativo para varios materiales tanto de la herramienta como de la pieza, los resultados obtenidos proporcionan poca información con respecto a la naturaleza fundamental del desgaste durante el mecanizado, y no dan una medida absoluta del rendimiento de la herramienta que pueda ser relacionado con su comportamiento en situaciones prácticas. Un ensayo de desgaste rápido propuesto más recientemente requiere que la herramienta sea preparada esmerilando una zona de desgaste artificial en su flanco.

Se miden las variaciones en la magnitud de esta zona de desgaste ocasionadas por una pequeña cantidad de mecanización y se obtiene así el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo en la región lineal de la curva de desgaste. Para este ensayo debe tenerse el cuidado de esmerilar la zona artificial de desgaste con un ángulo de holgura ligeramente negativo, para que el contacto friccionante entre la herramienta y la pieza, sea establecido desde el principio de la prueba.

4. MECÁNICA DE CORTE

INTRODUCCIÓN

El corte por arranque de viruta es una de las técnicas más importantes para el conformado de los metales. Los métodos modernos de producción imponen siempre altas demandas en máquinas y herramientas. Por esto, los valores obtenidos empíricamente en la práctica, no son suficientes para establecer las condiciones óptimas de corte. Cuando la herramienta cortante ejerce una fuerza en la pieza de trabajo para desprender la viruta, a ésa se le denomina fuerza de corte; para nuestro interés analizaremos el modelo más simple para el torneado.

La velocidad de corte, profundidad de corte, avance, tipo de material y geometría de la herramienta de corte, así como el refrigerante, son sólo algunas de las características del proceso que gobiernan la magnitud y la dirección de la fuerza de corte.

Un poderoso medio para la ingeniería de producción e investigación son los transductores piezoeléctricos con los cuales se pueden medir las componentes de las fuerzas en un sistema de coordenadas determinado. Algunos ejemplos de aplicación son: investigación en la maquinabilidad de materiales, comparación y selección de herramientas, comparación de materiales similares de diferentes fuentes, determinación de las condiciones óptimas de corte, determinación de los refrigerantes y lubricantes adecuados, investigación de las condiciones óptimas para un mejor acabado superficial. Como podemos observar, la medición de las fuerzas de corte es de gran importancia en toda actividad de maquinado, para obtener las condiciones óptimas de operación. Véase la Fig.4.1.

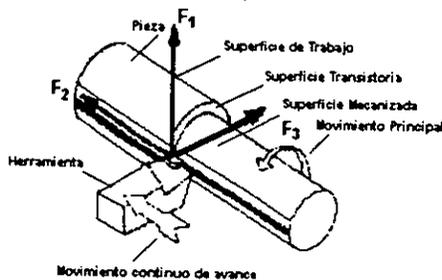


Fig.4.1 Fuerzas que intervienen en el maquinado.

Fuerzas de corte en el torneado. Mediante la expresión siguiente se obtiene la magnitud de la fuerza de corte que se presentan en el torneado:

$$F_1 = (K_c)(S)$$

S = Área transversal de viruta, en milímetros cuadrados.

La sección o área transversal de viruta S se calcula como

$$S = (\text{Avance}) (\text{Penetración})$$

De acuerdo con la figura 4.1, F_1 , F_2 y F_3 tienen la siguiente relación:

$$F_1 = F_2 = F_3 = 4 = 2 = 1 \quad (\text{respectivamente})$$

$F_1(N)$ = Fuerza tangencial; dirigida hacia abajo. Suele ser la mayor de las tres.

$F_2(N)$ = Fuerza axial o de avance; está dirigida en dirección paralela a la línea central de la pieza.

$F_3(N)$ = Fuerza radial, dirigida en dirección perpendicular a la línea central de la pieza de trabajo.

La magnitud del momento se obtiene como sigue:

$$M = F_1 d / 4$$

Fuerzas de corte en el taladrado: La forma de conocer dicha magnitud es mediante la siguiente expresión:

$$F_o = 2F_1 + 2F_2$$

F_o se calcula con la siguiente expresión:

$$F_o = K_c a d / 4$$

donde:

F = Fuerza

K_c = Fuerza específica de corte (N/mm^2).

a = Avance por vuelta, en milímetros de la broca o pieza.

d = Diámetro de la broca, en milímetros.

El valor de K , se obtiene de la siguiente tabla, siendo este factor experimental y muy importante para la solución de problemas relacionados con fuerzas de corte, para las características del material de que se trate.

Material		Dureza HB	Ks	
			Kp / mm ²	Lb / in ²
Acero sin aleación	C 0.15 %	125	190	270188
	C 0.35 %	150	210	298620
	C 0.70 %	180-250	230	327860
Acero bajo en carbono	Recocido	125-200	210	298620
	Endurecido Templado	200-275	250	355500
Acero alto al carbono	Recocido	220-325	275	391050
	Endurecido	325-450	300	426600
	Templado			
Acero inoxidable recocido	Martensítico	150-270	230	327060
	Ferrítico Austenítico	150-220	260	369720
Fundición de acero	No aleado	150	180	255860
	Baja aleación	150-250	210	298620
	Alta aleación	160-200	240	341280
Acero al magnesio (12%)		250	360	511920
Acero rolado		HRC 50-65	450	639900
Fundición de hierro Maleable	Viruta corta	110-145	110	156420
	Viruta larga	200-250	100	142200
Fundición de hierro gris	Baja tracción	100	110	156420
	Alta tracción	150	260	369720
Acero modular	Ferrítico	160	110	156420
	Perlítico	250	180	255960
Fundición de hierro enfriado		400	275	391050
		600	350	497780
Cobre electrolítico		50-85	110	156420
Fundición bronce-latón	Aleación latón-plomo latón rojo bronce fosforado	80-150	70	99540
		60-110	75	106650
		85-110	175	248050
Aleación de aluminio	No tratable	30-80	50	71100
	Tratable	80-120	70	99540
Fundición aleación De aluminio	No tratable Tratable	100	75	106650
		130	90	127900

4.1 CALCULO DE LAS FUERZAS DE CORTE

Un tipo de fórmula empírica para calcular la velocidad de corte en pies por minuto, que toma en cuenta los efectos de algunas de las más importantes variables en operaciones de corte de metal es:

$$V = \frac{(A B C D E F G P Q)^{0.2}}{H^{1.7} R^{0.16} T^n f^{0.38} c^{0.2}}$$

A=denota el material de la herramienta.

B=se refiere al efecto del fluido de corte.

C=representa el tipo del material de trabajo.

D=proporciona la tolerancia a diferentes microestructura

E=representa la rugosidad de la superficie de la pieza.

F=abarca el tipo de herramienta.

G=es una constante que depende del tipo de maquinado.

H=es el no. de dureza Brinell del material de la pieza.

P=Tiene en cuenta las diferencias en los materiales de herramienta.

Q=es la cantidad decimal del desgaste en vacío permitido en la herramienta.

R=es el número de dientes de la herramienta cortante.

T=representa la vida de la herramienta en minutos.

f=es la alimentación en pulgadas por revolución.

c=corresponde a la profundidad de corte, en pulgadas.

Los valores promedio de *n* son 0.125 para el acero rápido, 0.25 para los carburos cementados, y 0.7 para los óxidos sinterizados. Los valores de los exponentes en una fórmula como la ecuación anterior, se seleccionan para ajustar un gran número de puntos de prueba. Esto puede hacerse por el ajuste matemático de curvas y técnicas de regresión. Algunas de dichas fórmulas están diseñadas para un conjunto limitado de condiciones, otras se basan en un conjunto de pruebas, y otras más en pruebas distintas. Por estas razones aparecen diferencias entre las diversas fórmulas en los valores asignados a los factores y exponentes, aunque todas ellas se basan en comportamiento aproximado al real.

Existen varios programas de computadora digital para calcular y especificar los parámetros de corte de metal para satisfacer las entradas que describen las condiciones de la operación. La principal razón de presentar la ecuación anterior es mostrar, en general, como afectan los factores principales a la velocidad de corte. Muchas otras variables como la forma, el tamaño de la pieza de trabajo, la condición de la máquina, las herramientas y la condición de la operación, influyen en el comportamiento más o menos en diversos casos. En realidad, ninguna fórmula puede explicar todas las posibilidades en el presente estado de conocimiento en el corte de metal. La misma operación puede mostrar hasta una diferencia de 40% en la vida de la herramienta de una máquina a otra; y diferentes lotes de acero de una clase pueden requerir 40% o más de diferencia en la velocidad de corte para la misma vida de la herramienta. Un investigador informa que las diferencias ordinarias en las herramientas de rectificado en un taller, dieron como resultado una variación de 15% en la velocidad de corte para una vida de herramienta de 60 min, y las variaciones en la microestructura en la misma barra pueden causar que la velocidad de corte para la misma vida de la herramienta varíe más de 30%. Cuando se usan fórmulas en el taller, como para determinar la velocidad de corte, es buena práctica tener un procedimiento para comparar continuamente los resultados con el comportamiento y modificar los factores para adaptarlos a las condiciones presentes.

4.2 FORMACIÓN DE VIRUTAS

Existe cierta controversia sobre la teoría que mejor explica la formación de una viruta en el corte de metal. La siguiente es una de las teorías con más aceptación, cuyo propósito es ayudar a proporcionar un mejor entendimiento para el uso y diseño de herramientas. La herramienta es simplemente un dispositivo para aplicar cargas externas al material de trabajo. Si una herramienta es lo suficientemente fuerte para que no vaya a fallar y el trabajo es lo bastante rígido para resistir la deflexión al alejarse de la herramienta, se producirá una viruta por un movimiento relativo entre los dos, sin importar la forma de la arista de la herramienta en contacto con el trabajo. Aunque cualquier forma de arista puede provocar que se forme una viruta, ciertas formas presentan más

eficiencia en el uso de la energía de trabajo que otras, y exhibirán menos tendencia a establecer fuerzas de tal magnitud, que la herramienta o trabajo pueda dañarse. Las fuerzas se crean por movimientos de la herramienta. En la figura se presenta la herramienta con una sola punta que se mueve en el trabajo y lo somete a carga a la compresión. La carga puede descomponerse en dos fuerzas: una perpendicular a la cara de la herramienta, la cual se llama fuerza normal, y una fuerza a lo largo de la cara de la herramienta, que es la fuerza de fricción. Las dos fuerzas pueden sumarse vectorialmente para producir una resultante que actúa hacia abajo dentro del material de trabajo.

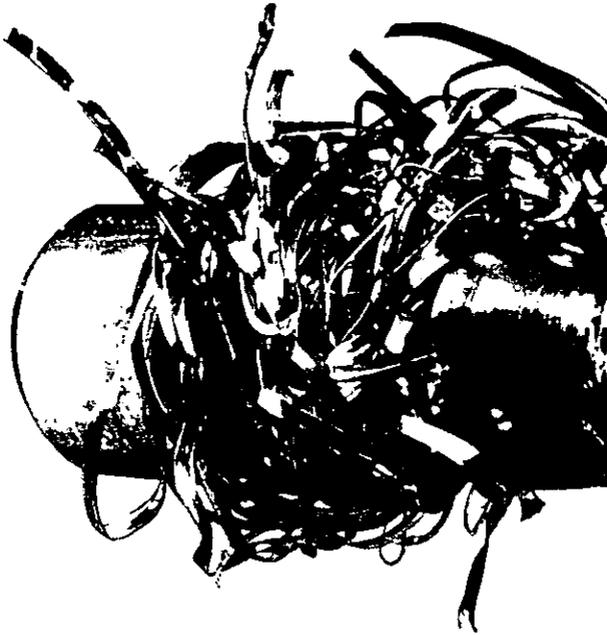


Fig.4.1. Vista de como se atasca la viruta sobre la pieza trabajada. (Sandvik Turning/Coromant)

La dirección y magnitud de la resultante depende de sus dos fuerzas componentes, y está influenciada por el ángulo de la cara de la herramienta y el coeficiente de fricción entre la viruta y dicha cara. Ocurrirán en la herramienta fuerzas iguales y opuestas, pero éstas son de poco interés, siempre que el útil de corte sea lo suficientemente fuerte para soportar las cargas aplicadas.

Los esfuerzos causan la falla del material. Una fuerza externa aplicada en una sola

dirección puede establecer esfuerzos en otras direcciones dentro del material. En la figura se muestra que los máximos esfuerzos cortantes se inducen a un ángulo de aproximadamente 45° respecto de la dirección de la resultante, y que la región plana que se extiende desde la punta de la herramienta cortante a la superficie sin cortar del trabajo, está expuesta a estos esfuerzos cortantes máximos. El flujo plástico se tiene cuando los esfuerzos cortantes alcanzan un valor crítico para cualquier material. Conforme ocurre el flujo plástico a lo largo de este plano, el endurecimiento por trabajo aumentará la resistencia al flujo adicional, se desarrollarán esfuerzos más altos y la falla por fractura cerca de la punta de la herramienta, causará la separación de una viruta que viajará sobre la cara de la herramienta y, por lo tanto, creará la fricción que origina una de las fuerzas componentes que actúan sobre el trabajo.

4.3 TIPOS DE VIRUTAS

Quebrada o discontinua: Para este tipo, durante la formación de la viruta el material es sometido a grandes deformaciones y, si es frágil, se fracturará en la zona de deformación primaria cuando la formación es incipiente. Bajo estas condiciones la viruta se segmenta como se ilustra a continuación, y esta condición se conoce como formación de la *viruta discontinua*. Esta se produce siempre que se mecanicen materiales tales como hierro o bronce fundidos, pero también pueden producirse cuando se mecanizan materiales dúctiles a muy baja velocidad y grandes avances.

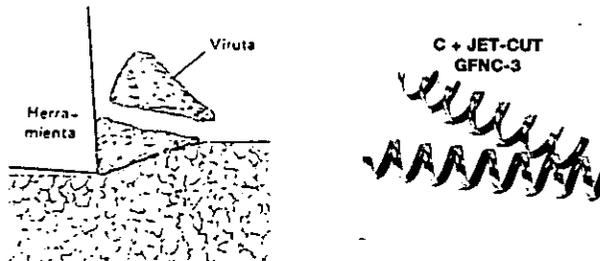


Fig.4.2 Indicación de un tipo de viruta discontinua (E. Doyle y Revista Self-grip/Iscar 1992)

Continua con recrecimiento del filo: En ciertas condiciones, la fricción entre la viruta y la herramienta es suficientemente grande para que esta se suelde a la cara de la herramienta. La presencia de este material soldado aumenta aún más la fricción, y este aumento induce el autosoldamiento de una mayor cantidad de material de la viruta. El material acumulado resultante se conoce como *filo recrecido*, como se ilustra en la figura 4.3. A menudo el filo recrecido continúa aumentando hasta que se libere a causa de su intensidad. Los pedazos son entonces arrastrados por la viruta y por la superficie generada en la pieza. La figura muestra una superficie rugosa obtenida en estas condiciones. El estudio del recrecimiento del filo en el corte de metales es de suma importancia, porque este fenómeno es uno de los principales factores que afectan el acabado superficial y puede tener una influencia considerable en el desgaste de las herramientas.

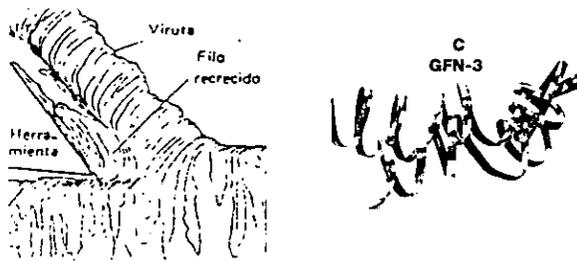


Fig. 4.3 Virutas continuas con filo recreado (E. Doyle y Revista Self-grip/Inscar).

Continua: Este tipo de viruta es común cuando se mecanizan la mayoría de materiales dúctiles, tales como hierro forjado, acero suave, cobre y aluminio. Puede decirse que el corte bajo estas condiciones es un proceso estable. Por esta razón la mayor parte de la investigación acerca del corte de metales ha estado relacionada con la producción de viruta continua.

Básicamente esta operación consiste en el cizallamiento del material de trabajo y en el deslizamiento de la viruta sobre la cara de la herramienta de corte. La formación de la viruta tiene lugar en la zona que se extiende desde el filo de la herramienta hasta la unión entre las superficies de la pieza; esta zona se conoce como la zona de deformación primaria como se muestra a continuación. Para deformar el material de esta manera, las fuerzas que se transmiten a la viruta en la interfaz existente entre ella y la cara de la herramienta, son suficientes para deformar las capas inferiores de la viruta a medida que se desliza sobre la cara de la herramienta, en la zona de deformación secundaria.



Fig.4.4 Un tipo de viruta continua (E. Doyle y Revista Self-grip/Inscar).

5. FLUIDOS DE CORTE Y SU CLASIFICACIÓN

INTRODUCCIÓN.

Otro importante tema a considerar dentro del área de las máquinas-herramientas son los lubricantes y los refrigerantes. Dentro del mecanizado o maquinado de los materiales generalmente se presenta un problema que es el incremento en la temperatura. El calor producido al efectuar la operación de corte, sobre una pieza metálica puede provenir de las siguientes causas:

- Energía procedente de la deformación plástica.
- Rozamiento o fricción de la viruta arrancada con la herramienta y la pieza.
- Fricción de la herramienta contra la pieza metálica que se mecaniza.

Estas son las causas principales de aportación de calor y representan aproximadamente 67% del calor total producido.

En cualquier operación de maquinado con arranque de viruta por medio de una herramienta de determinada dureza, es necesario consumir cierta cantidad de energía, la cual alrededor de 98% se convierte en calor. En todo mecanizado, al arrancar la viruta se produce una deformación plástica o reblandecimiento. Este efecto mecánico del material tiene lugar en aquella zona cortante de la pieza, convirtiéndose también en calor la energía necesaria para conseguir la deformación plástica, con lo cual el problema térmico de la operación se agrava aún más.

5.1. FLUIDOS DE CORTE

Las necesidades que se deben satisfacer o se pudieran presentar con respecto al cambio de temperatura, oxidación, etc., en el corte de materiales por arranque de viruta, es contrarrestada por los fluidos de corte (básicamente líquidos). Estos por su utilidad y naturaleza, se clasifican en grupos, según las necesidades requeridas en la operación de corte.

El fluido de corte es un medio o material enfriador, y el enfriamiento es una acción importante a todas las velocidades de corte. Las altas temperaturas son la causa principal del desgaste de la herramienta. El sobrecalentamiento de la pieza de trabajo puede encorvarla. Los enfriadores ayudan a corregir estas condiciones. Los fluidos de corte favorecen el deslizamiento de la viruta sobre la cara de la herramienta. La lubricación reduce las fuerzas de fricción que actúan sobre la herramienta, mejorando la vida de la misma y disminuyendo el consumo de energía. La tendencia a formar un borde se ve disminuida por la lubricación, y con esto se mejora el acabado superficial, pero la velocidad de corte es mucho más efectiva que el lubricante, en el mejoramiento del acabado.

Los líquidos se llaman comúnmente aceites de corte, y se dividen en varios subgrupos que son:

- De baja presión.
- De mediana presión.
- De extrema presión clorados.
- De extrema presión sulfoclorados

Cada uno debe poseer ciertas propiedades características; a continuación se mencionan algunas de ellas.

Los de baja presión se componen de aceite mineral, aditivo antioxidante y aditivo antiespumante; deben tener poca viscosidad.

Las viscosidades de estos aceites para poder maquinar o mecanizar directamente con ellos, deben ser bajas; de acuerdo con la clasificación SAE la viscosidad debe ser de 10. Otra condición importante es la de que no se debe formar emulsión con el agua y debe resistirse la oposición mecánica de los metales; además operar a un flujo bajo y tener una conducción térmica adecuada.

Los de mediana presión están constituidos por aceite mineral, aditivo antioxidante, aditivo antiespumante y el aditivo llamado "mild extreme pressure".

Las viscosidades de estos aceites deben ser bajas, si bien ligeramente superiores a las de

los fluidos de corte de baja presión.

Los de extrema presión clorados deben abarcar una amplia gama de viscosidades, y además de los aditivos contenidos en los aceites mencionados, a los de mediana presión debe añadirse a su composición aditivos llamados EP (de "extreme pressure").

Los de extrema presión sulfoclorados poseen las mismas características que los de extrema presión clorados, y además tienen en su composición química aditivos sulfurados.

Aceites sulfurados: Son aceites constituidos a base de manteca de cerdo disuelta en un 90% de aceite mineral sulfurado. Suelen llevar aditivos EP con azufre libre. Los aceites sulfurados permiten acabados excelentes y suelen disolverse con keroseno.

Aceites clorados: Suelen estar compuestos generalmente de un aceite mineral y un compuesto orgánico clorado, como la cloroparafina.

Todos estos aceites adicionados contienen un aditivo EP; y son corrosivos, pero este factor carece de importancia, puesto que el aceite de corte suele estar muy poco tiempo en contacto con la pieza, no ocasionando por ello un excesivo peligro de oxidación, ya que inmediatamente después de realizar el mecanizado se procede a lavar la pieza.

5.2.FLUIDOS PRINCIPALMENTE REFRIGERANTES

Se usan diversos fluidos como refrigerantes principalmente, dependiendo del propósito para el cual se utilizan, pero ello depende también, en menor grado, del material de trabajo y la herramienta. Rara vez se usan los gases como refrigerantes debido a su capacidad limitada para transportar el calor, aunque si se usa en el maquinado de hierro colado, con frecuencia será aire bajo succión. En este caso, el principal uso del refrigerante es transportar hacia afuera las pequeñas virutas producidas en la operación.

El agua es un material refrigerante usado con frecuencia debido a su alto calor específico y buenas cualidades de enfriamiento, pero debe acondicionarse para el uso por la adición de cierta clase de inhibidores de herrumbre. Materiales alcalinos, tales como carbonato de sodio, bórax o fosfato trisódico, se agregan algunas veces para inhibir la tendencia al herrumbrado en partes de acero o hierro, pero con más frecuencia se usan otros materiales como aditivos para este propósito.

Los llamados aceites solubles son aceites que contienen un agente humectante que provoca que se descompongan en gotas diminutas, las que se dispersan a través del agua. Estos aceites se transportan luego a todos los lugares que alcanza el refrigerante; revisten las superficies con una película aceitosa, que proporciona protección y al mismo tiempo da valor lubricante al fluido. Estos aceites pueden usarse según diversas concentraciones; todo depende de la aplicación particular y de la necesidad de lubricación del tipo de aceite.

La lubricación y otras cualidades necesarias pueden agregarse al agua por el uso de aditivos químicamente activos producidos comercialmente según diferentes marcas. La mayoría de los aditivos también contienen ingredientes para controlar la proliferación bacteriana, y retardan en esta forma el arrancamiento y el desarrollo de bacterias que pueden causar fuertes olores o dañar al personal.

Se usan diversos aceites para presiones altas de corte. En muchos casos donde se producen virutas relativamente grandes y las presiones de corte son altas, se usan aceites como refrigerantes. Estos pueden ser de origen animal, vegetal o mineral. El de manteca es el aceite animal de uso más común para este propósito y puede combinarse con aceites minerales. Los aceites vegetales no se usan para la aplicación de enfriamiento, debido a que tienen un mercado mejor para otros usos y es probable que su costo resulte alto. Los aceites minerales de uso más frecuente son la kerosina y el aceite de parafina, a veces combinados con los aceites grasos para el desarrollo de características mejores. La mayoría de los refrigerantes tipo aceitoso contienen compuestos de azufre o cloro como aditivos para mejorar su capacidad, y reducir el coeficiente de fricción por la formación de sulfuros y cloruros metálicos en los materiales del trabajo o la herramienta.

Los refrigerantes por lo general se aplican en grandes cantidades. Para realizar satisfactoriamente la disipación de calor, los refrigerantes necesitan usarse en alto volumen. Después de pasar sobre el área de corte, el fluido llega a un sumidero donde la mayor parte del calor se disipa al aire, y las virutas o impurezas pueden asentarse y colarse antes de que se recircule el fluido a la herramienta cortante. El método usual y más satisfactorio de aplicar el fluido para trabajo general es inundar el área con un gran volumen de material a baja presión. Se ha intentado diseñar métodos mejores de aplicación de refrigerante, pero la mayoría de esos otros procedimientos han sido satisfactorios sólo para

tipos limitados de trabajo.

En operaciones grandes es posible suministrar el refrigerante por medio de un sistema centralizado. Después de retornar de las máquinas, el fluido puede filtrarse y esterilizarse para evitar la proliferación de bacterias que provocan enfermedades y causan malos olores.

Inconvenientes del corte sin refrigeración.

Los inconvenientes del trabajo realizado sin refrigeración, se deben al calentamiento simultáneo de la herramienta, de las virutas y de la pieza.

Cuando la herramienta es de acero rápido, puede llegar a alcanzar durante el trabajo una temperatura a partir de la cual su dureza disminuye rápidamente.

También el calentamiento de la pieza es muy perjudicial: la dilatación falsea las dimensiones y hace imposible una comprobación precisa. En el caso de torneado entre puntos, el alargamiento de la pieza puede dañar el contrapunto. Además, cuando la pieza es larga, el calentamiento puede ocasionar una deformación permanente de la misma.

Por último, la temperatura a la que salen las virutas en trabajos de desbaste, puede representar un serio peligro para el operador de la máquina, si no se adoptan las precauciones especiales para dirigir las virutas.

Ventajas de la refrigeración.

La refrigeración determina siempre una mayor producción por unidad de tiempo, cualquiera que sea la calidad del tipo de herramienta empleada, puesto que proporciona las siguientes ventajas:

- Enfria simultáneamente la herramienta y la pieza. Con ello se evitan estos inconvenientes: dilatación, esfuerzo normal sobre el contrapunto, etc., y se mantiene el filo de la herramienta a una temperatura inferior a la que corresponde la pérdida de sus cualidades de corte.
- Disminuye el trabajo de rozamiento, pues la lubricación facilita el deslizamiento de la herramienta sobre la pieza y el de la viruta sobre la cuchilla.
- Reduce la potencia consumida por la máquina para la producción de un determinado peso de virutas.
- Permite aumentar, ya sea la velocidad de corte, a la sección de viruta, o ambas cosas a la vez. En todos los casos, el precio de costo por kilogramo disminuye notablemente.

- Aumenta la producción de virutas entre dos afilados de la cuchilla y, de una manera general, reduce su desgaste. por lo que su afilado es más sencillo que si se trabaja en seco. Prolonga la duración de las herramientas y, por consiguiente, puede ser menor el capital invertido en las mismas.

Resumiendo, la refrigeración de las herramientas proporciona: una calidad mejor en los trabajos realizados, una economía notable en mano de obra, fuerza motriz y en herramientas, además de una utilización más racional de las máquinas, que al trabajar más de prisa, emplean menos tiempo en la ejecución de los trabajos.

En lo que respecta al ahorro de fuerza motriz, numerosos ensayos realizados en condiciones de corte bien determinados han demostrado que la reducción en el consumo de potencia por el hecho de trabajar con refrigeración es del orden del 10%.

5.3. FLUIDOS PRINCIPALMENTE LUBRICANTES

Es común que se apliquen fluidos a las operaciones de corte de metales, principalmente para enfriar la herramienta y la pieza de trabajo, así como para suministrar lubricación. Algunas veces se deriva poco beneficio de un fluido de corte pero en la mayoría de los casos son posibles incrementos del 20% al 50%, y algunas veces mayores, en la velocidad de corte con la misma vida de la herramienta cuando se utiliza un fluido de corte, si se compara con el corte en seco.

La acción de lubricación de los fluidos de corte es sólo efectiva a bajas velocidades de corte, por ejemplo a una velocidad de 30 m/min (100 pie/min) podemos decir que ya es deficiente la acción lubricante, y a velocidades de 120 m/min (400 pie/min) y superiores, es totalmente ausente la acción de la lubricación. A altas velocidades el fluido de corte no tiene tiempo de llegar a la cara de la herramienta en donde la puede lubricar, por lo cual lo único que se puede lograr es el enfriamiento externo de la herramienta.

Un fluido de corte resulta útil para enfriar y alejar las virutas que se forman en la operación. Tal fluido también debe ser capaz de lubricar los elementos expuestos de la máquina, prevenir la corrosión y no ser dañino para el operador. Por lo general un fluido de corte fluye en un chorro continuo sobre la parte superior de la herramienta y la

viruta. El flujo no debe interrumpirse con los carburos debido a que se agrietan con facilidad por cambios repentinos de temperatura.

Se obtienen algunas ventajas dirigiendo el flujo hacia arriba entre la cara en relieve de la herramienta y la pieza de trabajo. A altas velocidades el flujo puede apartarse del corte y formar una masa. Esta puede rociarse formando una neblina de arriba a abajo. Se puede inyectar un chorro de fluido en el espacio entre la cara en relieve de la herramienta y la pieza de trabajo. En algunas circunstancias llega al borde de corte y aumenta en buen grado la vida de la herramienta. Sin embargo, el método requiere de un equipo costoso y de un cuidado extra del operador, y no es muy usual. La inundación con fluido de corte es tan efectiva como cualquier otro método a bajas temperaturas, y menos costoso. A altas temperaturas, una capa de vapor es atrapada por el fluido inundante, impidiendo así que el fluido llegue y enfríe la superficie. La neblina aleja la capa de vapor y enfría con eficiencia. Esto sólo ayuda dentro de un intervalo limitado debido a que se genera una nube gruesa de vapor a temperaturas aún mayores y mantiene alejada incluso a la neblina o al rociado.

5.4 CLASIFICACIÓN

Los fluidos de corte se pueden clasificar como:

- 1) gases
- 2) soluciones acuosas
- 3) aceites
- 4) ceras

Los gases tienen una limitada capacidad de enfriamiento y son fluidos de corte relativamente poco usados. Algunas veces se arroja aire comprimido sobre el hierro colado que se corta. El dióxido de carbono a bajas temperaturas puede dirigirse y enfriar una herramienta sin que se temple el material de trabajo. El agua es el mejor medio de enfriamiento y el fluido más efectivo para enfriar a alta velocidad, pero tiene poco valor lubricante; no se rocía bien sobre una superficie para humedecerla debido a su elevada tensión superficial y causa incrustaciones y corrosión. Se mezcla con productos

químicos y aceites para mejorarla como fluido de corte.

Los fluidos de corte químicos o sintéticos contienen principalmente modificadores del agua sin aceites. Pueden ser enfriadores puros que contienen sólo absorbedores del agua e inhibidores de la oxidación, o pueden ser enfriadores lubricantes con agentes humedecedores y/o agentes de presión extrema (EP) como yodo, azufre y fósforo. Entre otros productos químicos que se usan como fluidos de corte se incluyen los germicidas y los agentes mezcladores. Los productos químicos aumentan las capacidades de penetración y enfriamiento del agua, aún más que los aceites; reducen la corrosión y añaden lubricidad que se aproxima a la de los aceites. Los fluidos químicos tienen vidas útiles largas, detergencia y limpiezas elevadas, y no requieren que se les desengrase después de usarlos. No es recomendable usarlos en algunas máquinas en donde se pueden meter en las grietas y los cojinetes, y algunas sustancias dejan residuos abrasivos cuando se evaporan, lo que puede ser dañino para las piezas deslizantes.

Los fluidos de corte comunes, conocidos como aceites solubles o dispersables, son emulsiones de aceite mineral con emulsificantes (como el jabón en el agua), y algunas veces también, con agentes EP. Las mezclas pueden variar desde 5 hasta más partes de agua por una de aceite. Se añaden otros compuestos para obtener diversas propiedades, como resistencia a la presión extrema cuando se necesite. Es bajo el costo de las soluciones de aceite soluble.

Los aceites para corte recto son aquéllos que no se mezclan con agua; se clasifican como activos e inactivos, de acuerdo a si están o no mezclados con productos químicos. Los aceites minerales inactivos no se usan mucho pero sirven satisfactoriamente en materiales que son inherentemente de corte libre. Tienen un calor específico cercano a la mitad del valor para el agua, y un grado bajo de adhesión o viscosidad, pero son muy estables y no desarrollan olores desagradables. En cuanto a su viscosidad, van desde el keroseno utilizado sobre magnesio y aluminio, hasta parafinas ligeras para latón al corte libre. Durante algún tiempo los aceites grasos inactivos fueron muy utilizados, pero en la actualidad se usan poco por su alto costo. Los aceites grasos tienen mejores propiedades humidificantes y de penetración que los aceites minerales, y ambos se mezclan con pequeñas cantidades de productos químicos, principalmente para que sirvan casi tan bien

como los aceites activos con menos tendencia a manchar la superficie de trabajo.

El azufre, y en menor grado el cloro y el fósforo, se mezclan tanto con aceites minerales como grasos para formar compuestos de aceite para corte activo, a fin de obtener propiedades altas de antisoldamiento y lubricación bajo presiones extremas. Los ingredientes activos se combinan con las superficies metálicas para formar películas adhesivas pero deslizantes. Estos compuestos desempeñan una parte importante en la práctica moderna del corte de los metales, usándose extensamente para el torneado pesado, el tallado de engranajes, el cepillado, etc., de materiales tenaces, acordonados y raramente suaves. Estos agentes no resultan ventajosos para los cortes ligeros.

En cuanto a las ceras, algunas de ellas, son absorbidas fuertemente por las superficies metálicas, y aumentan las acciones de otros ingredientes para formar fluidos de corte que tengan propiedades de lubricación a presión y temperatura elevadas. No resulta fácil incorporar con éxito cera en un fluido de corte, y los intentos indiscriminados de aplicarla han fallado y dado a la cera una mala reputación como ingrediente de fluidos de corte, por lo cual sus aplicaciones resultan limitadas.

Como mencionamos anteriormente, los fluidos de corte y refrigerantes son de suma importancia para prevenir el efecto del desgaste; por eso son convenientes las siguientes tablas (A y B) para facilitar la selección de fluidos de corte en los diferentes tipos de operaciones de maquinado.

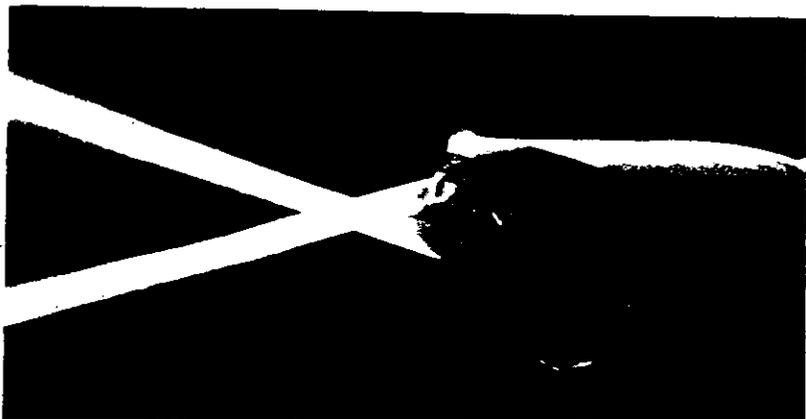


Fig. 5.1 Se aprecia una herramienta moderna equipada con solubilidad interna (Revista Cooljet 1997).

Características generales de los fluidos de corte

Tabla A

Tipo de lubricante	Características
	Aceites solubles, emulsificables
Uso general	Usados en porciones entre 1:10 y 1:40 dando una emulsión lechosa. Se aplican para propósitos generales.
Tipo claro	Usados en porciones entre 1:20 y 1:60. Las emulsiones varían de translúcidas a claras. Se aplican para rectificado y uso general.
Tipo graso	Se usan en concentraciones similares a las de uso general, también tienen apariencia lechosa. Su contenido de grasa animal las hace particularmente efectivas para operaciones generales en metales no ferrosos.
Extrema presión	Generalmente contienen aditivos de extrema presión clorados o sulfurados se usan en soluciones entre 1:10 y 1:20 donde se necesita un rendimiento mejor que el de los tipos anteriores
	Soluciones químicas
Fluidos de rectificado	Son esencialmente soluciones de inhibidores químicos de corrosión en agua. Se usan en soluciones entre 1:50 y 1:100 para operaciones de rectificado de hierro y acero.
Fluidos de corte sintético de uso general	Contienen principalmente inhibidores de corrosión solubles en agua y aditivos activos de superficie y que soportan cargas. Se usan en soluciones entre 1:10 y 1:40 para corte y en soluciones más altas para el rectificado. La mayoría son apropiados para materiales ferrosos y no ferrosos.
Fluidos de corte sintéticos de extrema presión	Tienen características similares a los del punto anterior pero contienen aditivos de extrema presión para dar mejores rendimientos al usarse con metales ferrosos.

Guía para la selección de fluidos de corte

Tabla B (1/2)

Materiales	Rectificado	Torneado	Fresado	Taladrado	Corte de engranaje por cepillado	Corte de engranaje por fresado	Brochado	Roscado
aleaciones no ferrosas de corte libre	aceites solubles de uso general y de tipo claro	aceite soluble de uso general	aceite soluble de uso general	Aceite soluble de uso general o de tipo graso	aceite soluble de uso general o de tipo graso	aceite soluble de uso general o de tipo graso	aceite soluble de uso general o de tipo graso	aceite soluble de uso general o de tipo graso, preferente mente los aceites de cortes puros
Aleaciones no ferrosas tenaces	aceites solubles de uso general y de tipo claro	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceite soluble de uso general o de tipo graso, preferente mente los aceites de cortes puros
Aceros de corte libre y bajo carbono	aceite soluble tipo claro o fluido químico para rectificado	aceite soluble o fluido sintético de uso general	aceite soluble de uso general o tipo graso	aceites solubles tipo graso o extrema presión; fluidos sintéticos	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros

Aceros de medio carbono	aceite soluble tipo claro o fluido químico para rectificadido	aceite soluble tipo claro o fluido químico para rectificadido	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros
Aceros aleados y de alto carbono	aceite soluble tipo claro o fluido químico para rectificadido	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros	son preferibles los aceites de corte puros	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	son preferibles los aceites de corte puros	son preferibles los aceites de corte puros
Aceros inoxidables y resistentes al calor	aceite soluble tipo claro o fluido químico para rectificadido	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros	aceite soluble o fluido sintético de extrema presión preferente mente los aceites de cortes puros	son preferibles los aceites de corte puros	son preferibles los aceites de corte puros	son preferibles los aceites de corte puros	son preferibles los aceites de corte puros

6. DESGASTE DE HERRAMIENTAS DE CORTE

INTRODUCCIÓN

La duración (o vida) de la herramienta de corte es un factor económico muy importante en el corte de metales. En operaciones de desbaste, los ángulos de la herramienta, las velocidades de corte y los avances se seleccionan de modo que se obtenga una duración económica de la herramienta, sin descartar otros factores como son calidad, tolerancias y configuraciones, entre muchas más. Las condiciones para las cuales se obtiene una vida relativamente corta de la herramienta son antieconómicas, por que los costos de reafilado o de remplazo de la herramienta son comparativamente altos. Por otra parte, el uso de velocidades y avances muy pequeños es igualmente antieconómico en razón de la baja productividad. Es cierto que en cualquier mejora en la herramienta o en el material de trabajo, la duración de la misma es benéfica. Con el propósito de tener una base para dichas mejoras se ha realizado un gran esfuerzo para entender la naturaleza del desgaste y de otros tipos de falla de las herramientas.

El deterioro de la superficie en la herramienta debido al uso es el desgaste, temperatura, resistencia, impactos, etc. Ocurre en una amplia variedad de operaciones, y en algunas industrias es muy elevado el gasto anual por concepto de reposición de piezas desgastadas.

El desgaste se puede presentar en dos formas que son: normal y destructivo, aun cuando sea normal el cual consiste en el desgaste ocasionado por el deslizamiento de planos y fricción ambos naturales por el proceso de corte y puede ser más severo que lo deseable, debido a la frecuencia con que sean repuestas esas partes. Ningún elemento, que constituye parte de la máquina, está exento del desgaste; este fenómeno ocurre siempre que existan cargas y movimientos. El destructivo es el originado por causas externas al proceso natural de corte las cuales pueden ser incrementos de temperaturas, impurezas de los materiales a maquinar, impactos repetidos, incorrectas configuraciones de las herramientas, descuidos de los operadores, etc.

En la actualidad no existe una regla que sea válida para todas las manifestaciones del desgaste; este fenómeno se presenta en una gran variedad de condiciones, tales como el tipo

y modo de la carga, tipo de lubricante y cantidad, temperatura, velocidad de corte, dureza, acabado de la superficie, presencia de materiales extraños y naturaleza química del medio ambiente. Así como las condiciones varían en cada aplicación, también lo hacen las correspondientes manifestaciones de desgaste. En la práctica el desgaste es generalmente una combinación de una o más formas elementales.

Un método lógico de clasificar el desgaste sería según la naturaleza de la superficie de contacto:

Metal vs. metal.

Metal vs. no metal.

Metal vs. fluido.

A su vez, se puede subdividir en condiciones de trabajo con lubricación y sin lubricación, con fricción por rodamiento o deslizamiento, etc. Además, las condiciones pueden cambiar, de modo que lo que en un principio era metal contra metal podría convertirse en metal contra no metal, o bien una lubricación óptima podría fallar posteriormente. Por esta razón, la clasificación anterior pierde su utilidad en la práctica real de la ingeniería, y se prefiere mejor agrupar en términos generales.

Aunque existen algunas diferencias entre estas formas de desgaste, según la severidad de la acción, desde el punto de vista de ingeniería, pueden ser agrupados bajo un solo título. Probablemente el tipo más importante de desgaste sea una forma adhesiva de dicho fenómeno. Está causado por la acción cortante de microsoldaduras formadas entre las asperezas de la superficie que realmente llevan la carga entre dos superficies correspondientes. Este tipo de desgaste se presenta por la falla de la película que normalmente separa a las dos superficies. A su vez, dicha falla es ocasionada por altas temperaturas, presiones y velocidades de corte. El grado de adhesión de los metales determina la magnitud del esfuerzo cortante producido entre las superficies en contacto. La solubilidad y el carácter de la aleación de un par de metales indican la tendencia a formar una unión en la interfaz. Por lo tanto, para que el par de metales sea resistente, debe cumplir dos condiciones:

- Que ambos metales sean químicamente afines (lo cual determina el número de uniones).

- Que al menos uno de ellos sea del subgrupo B (de la tabla periódica), lo cual determina la resistencia de las ligaduras o afinidades formadas (tipo de unión).

Otro tipo de desgaste importante se denomina desgaste abrasivo o de tipo cortante, y tiene lugar siempre que están presentes entre las superficies en contacto, sustancias extrañas duras, tales como areniscas de metal, óxidos metálicos, polvos y areniscas del medio. Esas sustancias primero penetran en el metal y después rayan o desgarran partículas metálicas. Según su intensidad, el desgaste abrasivo puede ser en forma de socavadura o de rayado, y éste es uno de los tipos más comúnmente encontrados en la práctica de la ingeniería. Probablemente sea la mayor causa de desgaste en muchas de las herramientas de corte.

Considerando el número de factores necesarios para describir el desgaste, se pueden mencionar los siguientes puntos:

- Las variables relacionadas con la metalurgia son: composición química, constitución y estructura, dureza y tenacidad.
- Las variables relacionadas con el servicio son velocidad, presión, temperatura, materiales de contacto y acabado de la superficie. Otros factores que contribuyen son la lubricación y la corrosión. Además, el desgaste que ocurre en la práctica, es en la mayoría de los casos una combinación de una o más formas elementales.

Es probable que las partículas generadoras de abrasión comiencen por penetrar en el metal, y después causen deterioro en la superficie, introduciendo esfuerzos que lo agrietan y conducen a su desgaste. Por ello los factores que se consideran de mayor importancia en el desgaste de la herramienta son: dureza, carga, temperatura, velocidad de deslizamiento, contaminantes y efectos ambientales.

6.1 DEFINICION DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE

La naturaleza fundamental del mecanismo de desgaste puede ser muy diferente para diversas condiciones de trabajo. En el corte de metales, el desgaste se puede presentar en formas diversas como son: por adhesión, por abrasión y por difusión.

- Adhesión. Este tipo de desgaste es ocasionado por la fractura de las asperezas de los dos metales soldados entre si. En el corte de metales, las uniones de los materiales de la viruta y de la herramienta se forman como parte del mecanismo de la fricción. Cuando estas uniones se fracturan, pequeños fragmentos del material de la herramienta pueden ser arrancados y arrastrados por la viruta o por la superficie nueva de la pieza.
- Abrasión. Este desgaste ocurre cuando partículas endurecidas localizadas en la viruta, pasan sobre la cara de la herramienta y remueven su material mecánicamente. Estas partículas endurecidas pueden ser fragmentos de un filo recocado inestable y endurecidos por deformación, o fragmentos endurecidos del material de la herramienta y removidos por el desgaste por adhesión, o bien constituyentes duros del material de trabajo.
- Difusión. Ocurre en estado sólido cuando los átomos de una red cristalina metálica se desplazan de una región de concentración atómica alta, a una de concentración baja. Este proceso depende de la temperatura existente, y la difusión por unidad de tiempo aumenta exponencialmente con el aumento de la temperatura. En el corte de metales, en el que existe un contacto íntimo entre los materiales de la herramienta y de la pieza, además existen temperaturas elevadas, la difusión puede ocurrir en aquellos puntos en donde los átomos se desplazan desde el material de la herramienta hacia el material de trabajo. Este proceso que tiene lugar en una zona muy estrecha de la superficie de contacto entre los dos materiales, debilita la estructura superficial de la herramienta.

De esta misma manera existen otros tipos de fallas o desgastes, y los mencionados anteriormente son los más importantes en el estudio de las herramientas de corte, los cuales pueden variar de acuerdo con el tipo de material de trabajo.

6.2 MECANISMOS DE DESGASTE

Existen varios mecanismos básicos que son causa del desgaste de la herramienta. Generalmente se sobrentiende que el desgaste de la herramienta es debido al resultado de la abrasión que se produce por las partículas duras del material de la pieza que rayan la superficie de la herramienta. El desgaste también ocurre por la difusión o aleación del material de la pieza con el de la herramienta. En las zonas en las que las acciones de contacto son favorables, el material de la pieza reacciona con el material de la herramienta, originando un frotamiento entre ellas; el valor de éste depende de la temperatura en la zona de contacto y de la capacidad de reacción entre el material de la pieza y de la herramienta. La difusión o aleación también se produce cuando las partículas del material de la pieza se sueldan a la superficie de la herramienta. Estas disposiciones soldadas, resultan a menudo totalmente visibles en forma de alojamiento en el filo de corte, como partículas o capas de material de la pieza en el interior de un cráter, o bien como aleaciones que tienen lugar entre estos depósitos y la herramienta. Ello produce la debilitación de ésta por abajo del punto en que se ha producido la soldadura. Frecuentemente esos depósitos se unen nuevamente a la viruta mediante soldadura, como consecuencia de un simple desprendimiento debido a la fuerza de colisión de las virutas liberadas. Cuando esto sucede, una pequeña cantidad de material de la herramienta puede ser arrancada únicamente con el depósito de material de la pieza.

Este mecanismo puede originar que se desprendan partículas del filo de corte, así como la formación de cráteres en la cara de la herramienta, a los que se conocen como picaduras. Ello también contribuye a que el cráter se haga de mayor tamaño, que a veces se forma detrás del filo de corte. Entre los mecanismos restantes que pueden originar el desgaste de la herramienta se encuentran los fuertes gradientes de temperatura y choques térmicos que producen grietas en las proximidades del filo de corte, que finalmente serán causa de la rotura de la herramienta.

La anterior condición puede tener su origen en el empleo de procedimientos inadecuados para el afilado de la herramienta, fuertes pasadas con corte interrumpido, o en una aplicación inadecuada del fluido de corte cuando el maquinado se efectúa con

velocidades de corte elevadas. Las reacciones químicas que se producen entre los componentes activos de algunos fluidos de corte, aceleran a veces la formación del desgaste de la herramienta. La oxidación del metal calentado en las proximidades del filo de corte, contribuye también al desgaste de la herramienta, particularmente cuando se emplean velocidades de corte altas que originan altas temperaturas. La rotura del filo de corte originado por la sobrecarga, cargas de choque fuertes, o inadecuado uso de la herramienta, no debe considerarse como desgaste normal, y en consecuencia debe corregirse.

Por otro lado, el desgaste que se produce en el costado de la herramienta, por abajo del filo de corte, es algo indetectable y no puede evitarse. No deberá ser motivo de preocupación a menos que el desgaste se produzca con excesiva rapidez y la franja de roce sea muy grande. En la práctica, en vez de una medición precisa, se efectúa una apreciación visual, aunque en muchas ocasiones se omite. Este desgaste se mide en función de la pérdida de medida en la pieza. Sin embargo, la mejor medición es la que se hace basándose sobre la franja de roce. Cuando este desgaste llega a ser demasiado grande, la acción de frotamiento de dicha franja de roce contra la pieza se incrementa, debiéndose remplazar el filo de corte.

Cuando se usa por primera vez una herramienta afilada, la magnitud inicial de desgaste del costado resulta muy grande en relación con el desgaste total subsiguiente. Bajo condiciones de funcionamiento normal, el ancho de la franja de roce de contacto aumentará de manera uniforme, hasta alcanzar un tamaño crítico, a partir del cual, el filo de corte se deteriora completamente.

Lo anterior se denomina rotura catastrófica y el filo de corte debe cambiarse antes de que ello tenga lugar. Cuando se corta a bajas velocidades con acero rápido, puede haber grandes periodos de tiempo en los que no se aprecie un aumento del desgaste. En el caso de un material de pieza y un material de herramienta dados, el valor del desgaste del costado depende primordialmente de la velocidad de corte y después del avance.

6.3 FACTORES INFLUYENTES EN EL DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS

Como se mencionó anteriormente, los factores que se consideran más importantes en el desgaste de la herramienta son: dureza, carga, temperatura, velocidad de deslizamiento, contaminantes y efectos ambientales. En general puede decirse que una dureza elevada implica una maquinabilidad baja a causa del consumo de potencia y de las temperaturas, y por consiguiente, será alto el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Sin embargo, muchos otros factores afectan el desgaste, y también puede afirmarse que, en general, los metales puros tienden a adherirse a las superficies de trabajo de la herramienta de corte, dando lugar a la aparición de la fricción y desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Por ejemplo, cuando se mecaniza hierro puro, las fuerzas de corte y el desgaste de la herramienta son muy elevados, casi tanto como los valores que se obtienen cuando se mecanizan o maquinan aceros aleados muy tenaces.

La adición deliberada de azufre, plomo o telurio, tanto en los metales no ferrosos como en los aceros, aumenta la productividad y mejora el acabado superficial, pero no se entiende completamente el mecanismo de trabajo de estos aditivos. Parece que los aditivos mencionados reducen el contacto metálico entre la herramienta y el material de trabajo; por lo tanto, reducen la fricción y el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Estos constituyentes no afectan grandemente las propiedades mecánicas del metal base a temperatura ambiente, pero sí las afectan notablemente a temperaturas elevadas. El efecto del azufre, plomo o telurio sobre las propiedades de los metales a temperaturas elevadas limita el uso de estos metales denominados de alta maquinabilidad, pero a pesar de ello tienen gran aplicación en la práctica y su demanda es elevada. La falta de una teoría sobre el efecto del material de la pieza en el desgaste de la herramienta, dificulta la labor de los ingenieros, metalúrgicos y técnicos que intervienen en la producción. Por ejemplo, con la automatización creciente de los procesos de mecanizado es necesario mantener características consistentes del desgaste de las herramientas, pero es bien sabido que ocurren grandes diferencias en el desgaste, aun para herramientas de la misma especificación.

6.4 EFECTOS QUE PRODUCE EL DESGASTE

Un efecto muy notorio que produce el desgaste de la herramienta es el acabado superficial debido a la deformación que se produce en las herramientas de corte cuando se efectúa una pasada muy fuerte, empleando una velocidad de corte baja y un alto avance. En estas condiciones, una parte del filo adquiere una alta temperatura, la fuerte presión de corte comprime la nariz del filo, bajando la altura de la cara de corte en esta zona. Esto reduce el desprendimiento en las zonas más cercanas a la punta, se incrementa el ancho de la franja de rozamiento en esta zona y se reduce la vida de la herramienta.

El acabado superficial no necesariamente indica una deficiente disposición de la herramienta de corte, a menos que exista un rápido deterioro. Un buen acabado superficial resulta a veces una exigencia, pero la principal causa de un mal acabado de superficie es el recrecimiento que se produce a lo largo del filo de corte de la herramienta. El eliminar este recrecimiento mejorará notablemente el acabado superficial. El medio más efectivo para eliminar dicho recrecimiento del filo consiste en aumentar la velocidad de corte; cuando ésta se aumenta más allá de un cierto valor crítico se producirá una súbita y fuerte mejora en el acabado superficial.

Las herramientas de carburo cementado pueden funcionar con éxito a velocidades elevadas de corte, en las que no se produce el recrecimiento del filo y se obtiene un buen acabado superficial. Siempre que sea posible, las herramientas de carburo cementado deben funcionar a velocidades de corte en las que se obtenga un buen acabado superficial; pero hay ocasiones en que ello no es posible. Por otra parte, las herramientas de acero rápido no pueden actuar a velocidades de corte tan elevadas como para que no se forme el recrecimiento del filo. En estos casos el método más efectivo de obtener un buen acabado superficial consiste en emplear un fluido de corte que contenga aditivos de azufre activo y cloro. Los materiales de herramientas de corte que no se alean con rapidez con el material de la pieza, resultan también efectivos a la hora de obtener una mejora en el acabado superficial.

Los dos materiales principales que entran dentro de esta categoría son: carburo de titanio simple, y diamante. La presencia de las señales del avance pueden contrastar con lo que de

otra forma sería un buen acabado superficial, por lo que se debe dar suma atención al valor del avance y al radio de la punta de la herramienta, si se desea un buen acabado superficial; también suele resultar útil el introducir cambios en la geometría de la herramienta. Un pequeño plano o filo de corte secundario, hecho mediante rectificado y situado sobre el filo de corte detrás de la punta, proporciona a veces el acabado superficial requerido. Finalmente, cuando la herramienta está trabajando no se debe dejar que el desgaste del costado sea demasiado grande, particularmente en la zona de la punta, la cual es la que nos proporciona el acabado superficial.

Los mecanismos de desgaste que hemos descrito indican manifestaciones visibles de desgaste de la herramienta, que deben entenderse como tales a fin de que puedan aplicarse medidas correctivas cuando sea preciso; así pues el mejor procedimiento para corrección de anomalías consiste en tratar de corregir cada vez una sola condición. Cuando dicha condición es corregida, debe controlarse, y en seguida puede iniciarse el trabajo para corregir la siguiente. Como se mencionó, el desgaste en las herramientas de corte es muy importante, ya que esto repercute en su utilización. La creación de nuevos materiales o recubrimientos para herramientas es de suma importancia para así poder brindar una mejor utilidad. Otro efecto importante que produce el desgaste son no poder contar con las tolerancias en las piezas requeridas por el cliente.

6.5 DURACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

En la gran mayoría de las operaciones de maquinado, la máquina-herramienta tiene potencia más que adecuada, y el acabado requerido puede mantenerse por la elección apropiada de los factores que intervienen. En cualquier caso puede verse si los requerimientos de potencia y acabado son adecuados o no, con la distinción entre aceptación y rechazo fijada por la máquina-herramienta y las especificaciones del trabajo. La vida de la herramienta es un factor económico básico, y además es una clase diferente de medida de la maquinabilidad. Cualquier herramienta de corte puede cortar la mayoría de los materiales de trabajo, bajo casi cualesquiera condiciones de corte, siempre que la espiga de la herramienta no se fracture en realidad, por sobrecargas en exceso. Sin embargo, la

duración de la herramienta según diferentes conjuntos de condiciones de corte será muy diferente. Por lo general, esta consideración de la vida de la herramienta es el aspecto más importante de la maquinabilidad. La duración de la herramienta influye más en el costo del maquinado y determina la máxima productividad de cualquier habilitación.

De igual importancia que el procedimiento de medición es el procedimiento para determinar el final de la vida de la herramienta. Este puede ser la falla completa, de modo que la herramienta es incapaz de cortar, un cambio en el acabado de la pieza de trabajo que indique cambio en la geometría de la herramienta, un cambio en la magnitud de la fuerza o la potencia requeridas para el corte, un cambio en la dimensión de la pieza de trabajo, o una cantidad dada de desgaste en la herramienta, medida ya sea como el redondeo de la arista cortante o como una zona de desgaste en el flanco de la herramienta.

La falla completa rara vez se usa como método para determinar el final de la vida de la herramienta, excepto en operaciones de desgaste en herramientas desechables sin reafilado. Para las herramientas que tienen que reafilarse, debe considerarse la naturaleza de desgaste del útil con respecto al tiempo. En realidad al rápido redondeo inicial de la arista cortante le sigue un período relativamente largo durante el cual el desgaste en el flanco ocurre según una relación constante. En algún momento, el desgaste del flanco se acelera debido a un aumento de temperatura arriba de cierto punto crítico. Para el reafilado más eficiente, la herramienta debe retirarse en un momento que precede inmediatamente al inicio de la tasa acelerada de desgaste. En la práctica se hacen mediciones frecuentes de la zona de desgaste y se reafila la herramienta cuando se alcanza algún valor arbitrario. El desgaste en el flanco también es un método común para determinar las pruebas en laboratorio de maquinabilidad.

Como se indicó, muchas variables pueden afectar la vida de la herramienta, las cuales omitiremos en nuestro estudio por tratarse de una extensa gama interminable de variables, por lo que nos enfocaremos a las que se presentan más comúnmente en las industrias. La mayoría de esas variables se fijan por el diseño de la pieza de trabajo, la cual puede especificar el material; por la forma de la superficie a maquinar, qué límites de tipo de operación pueden usarse y posibilitan controlar la forma de la herramienta; por las máquinas que están disponibles para la operación, y por los materiales de la herramienta

que pueden escogerse debido a la disponibilidad, o porque el tipo de herramental está limitado a ciertos tipos de materiales de herramienta. Los fluidos de corte aumentarán la vida de la herramienta en casi todos los casos, pero su uso y método de aplicación depende de las consideraciones económicas globales. El costo de usar el fluido debe compararse con la ganancia en la duración del útil de corte.

La vida de la herramienta disminuye por cargas de choque; la continuidad del corte influye mucho en la duración de las herramientas, pero es afectado por la vibración y el paro completo. Las condiciones que controlan la vibración están influenciadas no sólo por la forma y resistencia de la pieza de trabajo sino también por la rigidez de la máquina-herramienta y del montaje del útil de corte, y por los factores que determinan la relación de eliminación del material. Una herramienta de un solo filo para torneado puede principiar un corte y continuar con una viruta uniforme hasta que el corte termina. Con una habilitación similar, la pieza de trabajo puede contener un cuñero longitudinal que sujete la herramienta a impacto y choque térmico durante cada revolución. El diente en un cortador de fresa está expuesto a iniciar y parar el corte una o más veces por cada revolución del cortador. En cada uno de estos casos, la vida esperada de la herramienta cambiará debido a las diferencias en el contacto del trabajo con la herramienta. El desarrollo de información exacta, con respecto al efecto de cualquier variable en la vida de la herramienta, está complicado por las numerosas variables que pueden afectar los resultados.

La información que se obtiene bajo un conjunto de condiciones no será útil según otros conjuntos de condiciones. Un problema adicional es la gran cantidad de material y tiempo requerido para efectuar pruebas exactas de vidas de herramienta. Se han realizado muchos intentos para acortar la pruebas de duración de herramienta, pero se han perdido resultados significativos en algunos casos debido a impropias suposiciones para simplificación. Algunos intentos requieren la prueba de una zona de desgaste pequeña y se extrapola la información a zonas de desgaste más grandes, suponiendo cierta relación conocida entre el tiempo y la tasa de desarrollo de la zona de desgaste.

Tales pruebas pueden ser satisfactorias, siempre que esté disponible la validación de pruebas o conocimientos previos. Se ha logrado cierto éxito por el uso de medios

radioactivos y la medición de la relación de desgaste de la herramienta. La primera información general sobre vidas de herramienta la reportó F.W. Taylor (quién desarrollo el acero rápido en 1907). Su trabajo ha sido la base de la mayor parte subsecuente.

Taylor mostró que la relación entre la velocidad de corte y la vida de la herramienta puede expresarse empíricamente por:

$$V_c T^n = C$$

donde:

V_c = velocidad de corte en ft/min

T = vida de la herramienta en min

C = constante que depende del material de trabajo, material de la herramienta y otras variables de máquinas.

v = Velocidad de corte que se da en un minuto de vida de la herramienta.

n = constante que depende del material de trabajo y de la herramienta.

Esta ecuación predice que cuando se grafica en escalas log-log, hay una relación final entre la vida de la herramienta y la velocidad de corte. Una excepción a esta relación ocurre a las bajas velocidades de corte con materiales de herramientas frágiles, donde puede ocurrir el descascaramiento de la herramienta, y la vida de la misma es menor que la predicha por la ecuación. El exponente n tiene valores desde 0.125 para herramientas de acero rápido, a 0.70 para herramientas cerámicas.

También se ha encontrado que los efectos de la alimentación y profundidad de corte en la vida de la herramienta pueden expresarse como:

$$C = V_1^n T_1^a f_1^b d_1 = V_2^n T_2^a f_2^b d_2$$

donde:

f = alimentación.

d = profundidad de corte.

n, a, b = exponentes que dependen principalmente del material de la herramienta y el material de trabajo.

El rango típico de n está dado arriba; el exponente " a " tiene valores promedio de 0.4 a 0.6, y " b " tiene valores de 0.1 a 0.2. El aumento de la alimentación de la profundidad de corte aumentará el tamaño de la viruta que se produce. Puede llevarse a cabo más y se genera más calor, pero debido a que la masa de la viruta es más grande, mucho del calor adicional será arrastrado sin proporcionar aumento en el calor transferido a la herramienta. Los cambios en profundidad y alimentación de corte, por lo tanto, tendrán efectos menores en la vida de la herramienta cuando se compara con los cambios en la velocidad de corte.

Se considera que el doble de cualquiera de las variables, duplica la tasa de eliminación del metal. Si la vida de la herramienta se midiera por el volumen de metal eliminado antes de la falla, sería evidente que el aumento, ya sea de la profundidad de corte o de la alimentación, resultaría en un incremento en la cantidad de metal eliminado.

Las conclusiones económicas no pueden basarse totalmente en estos cálculos. En prácticamente todos los casos, es cierto que en lo que concierne a la relación de eliminación de metal, puede obtenerse maquinado más económico con aumentos en la profundidad de corte y alimentación respecto a los límites establecidos por la rigidez, potencia y requisitos de acabado.

Los costos relativos de mano de obra y de herramienta, así como la naturaleza del trabajo por realizar, siempre influirán en el efecto de la velocidad de corte en los costos generales de fabricación o proceso. Es deseable, sobre todo en el trabajo de taller y en el de cuarto de herramientas, tener disponibles en tablas algunos valores promedios de la velocidad de corte para diferentes materiales y condiciones de trabajo. Los valores más bajos de dichas tablas por lo general son conservadores, porque es imposible prever las condiciones exactas de corte. Mucho del tiempo total invertido en el trabajo de cuarto de herramientas y de cuarto de taller está en la habilitación más bien que en el corte real. Los valores más altos casi siempre se usan en producción, y en muchos casos se obtienen por métodos de ensayo y error.

La vida corta de la herramienta algunas veces es más económica. Debe recordarse que la elección de todas las variables de máquina, incluyendo la velocidad de corte, no tiene el propósito de hacer que la herramienta dure tanto como sea posible; más bien, es un intento para escoger un conjunto de condiciones de corte mediante las cuales pueda derivarse la

más grande economía. En muchos casos (especialmente para cierto tipo de herramientas de bajo costo), una vida de sólo pocos minutos de duración a muy alta velocidad de corte puede ser lo más económico. Un estudio completo, incluyendo la consideración de los costos directos de mano de obra, de máquinas, tiempo muerto y afilado de herramientas, son necesarios para evaluar la velocidad de corte que debe usarse. Sin embargo, esto es cierto sólo para corridas largas de producción, debido a que el tiempo y costo de dicho estudio puede ser mayor que cualquier ahorro posible en las operaciones en cuarto de herramientas y en talleres de trabajo.

6.6 PATRONES DE COMPARACIÓN DE DESGASTES

A continuación se muestran las siguientes fotografías que fueron tomadas en un macroscopio a diferentes ampliaciones, las cuales se indican a continuación de cada patrón; además se muestran los tipos de desgastes más comunes ocurridos durante operaciones de maquinado, así como la causa que lo produce, su efecto y algunas alternativas de solución. Los pasos que seguimos para realizar dicho estudio fueron los siguientes: dar seguimiento a un proceso específico con el fin de seleccionar aleatoriamente y de diferentes procesos herramientas dañadas, es decir herramientas con las cuales ya no se cumplía con las especificaciones demandadas por el cliente, se analizaban cada una de ellas y se diagnosticaba de qué tipo de desgaste se trataba, qué lo provocaba, y cómo podíamos solucionarlo o en su defecto disminuirlo, apoyándonos en criterios de desgaste ya establecidos para facilitar la identificación del tipo de desgaste ocurrido. De acuerdo con las fotografías ampliadas resultaba más fácil poder visualizar el tipo de desgaste del que se tratara, se pudo comprobar que los desgastes son ocasionados por diversas causas que van desde una mala sujeción de la herramienta, operación deficiente de la máquina, una inadecuada selección de las velocidades de corte, demasiadas impurezas en el material de la pieza a trabajar, una deficiente selección de los fluidos de corte y refrigerantes. Este último parámetro es muy importante puesto que es una de las principales causas de un desgaste prematuro en la herramienta. Actualmente existen herramientas con lubricación interna la cual previene este factor de manera muy notable, a diferencia de una herramienta convencional, es decir con lubricación externa la cual no permite realizar barrenos profundos en un solo corte. En la actualidad en las herramientas equipadas con soluble interno (como la que se muestra en la pag. 70), éste factor ya no es de preocupación, puesto que se previene el desgaste y se realizan cortes más profundos en una sola operación; por ende se obtienen mejores resultados durante el proceso y se garantiza la durabilidad de la herramienta.

ROTURA DEL INSERTO (INSERTO DE DIAMANTE)



Foto 1. Ampl. 32X

El problema mostrado en la foto 1 se trata de la rotura del inserto. Esta daña no solo al inserto mismo, sino también a la placa de apoyo y a la pieza a trabajar, dejando un acabado superficial pésimo sobre la pieza trabajada.

La causa de esta falla se atribuye a una calidad demasiado frágil del inserto. Puesto que se trata de una herramienta de diamante, es muy importante tomar en cuenta la pureza del material a maquinarse, porque en este caso específico la falla mostrada fue a consecuencia de una incrustación en el material; de que también se presentó una geometría demasiado débil esto es por tener la herramienta un ángulo de ataque sumamente pronunciado; así mismo se pudo presentar una sobrecarga excesiva en el inserto o la herramienta, ocasionada por el operador, con lo cual la fuerza de corte normal aumentó considerablemente provocando en

consecuencia el desgaste mostrado, o por un inserto demasiado pequeño. Estas son las posibles causas por las que se presentó el desgaste en la herramienta.

Lo anterior se puede corregir o solucionar seleccionando una calidad de material mas tenaz para la herramienta, con el objeto de soportar ciertos golpeteos ocasionados por incrustaciones así como vibraciones durante el proceso, seleccionar una geometría más resistente, de preferencia un inserto de una sola cara, con el fin de concentrar los esfuerzos en una área mayor, y reducir las velocidades de avance así como la velocidad de corte evitando con ello una acumulación de esfuerzos en la herramienta.

DESGASTE EN INCIDENCIA Y POR ENTALLADURA



Foto 2. Ampl. 24X

En la Foto 2 se tiene un desgaste en incidencia y por entalladura; en el área central de corte se presenta un desgaste en incidencia rápido, lo que provoca un acabado superficial deficiente y ello provoca que la pieza se salga de especificaciones y tolerancias. El desgaste que se muestra en los extremos derecho e izquierdo de la herramienta, es un desgaste por entalladura, lo cual origina un acabado deficiente, corriendo el riesgo de la rotura total de dicho dispositivo.

Este tipo de desgaste es provocado por una velocidad de corte demasiado elevada y/o por una insuficiente resistencia al desgaste del material del que está hecha la herramienta. El problema de los extremos de la herramienta es ocasionado por una alta fricción y excesiva oxidación por tener una baja resistencia a la abrasión la herramienta.

Se pueden corregir dichos problemas reduciendo la velocidad de corte, seleccionando una calidad de material con mayor resistencia al desgaste, un recubrimiento de óxido de

aluminio (Al_2O_3) para el mecanizado de aceros, previendo la oxidación. Para materiales que se endurecen al ser mecanizados, se puede seleccionar un ángulo de posición más pequeño o una calidad de la herramienta con mayor resistencia al desgaste, y reducir la velocidad de corte pero teniendo la precaución de aumentarla cuando se mecanizan materiales termo-resistentes con las plaquitas de cerámica, o eligiendo una calidad de metal duro.

DESGASTE POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA

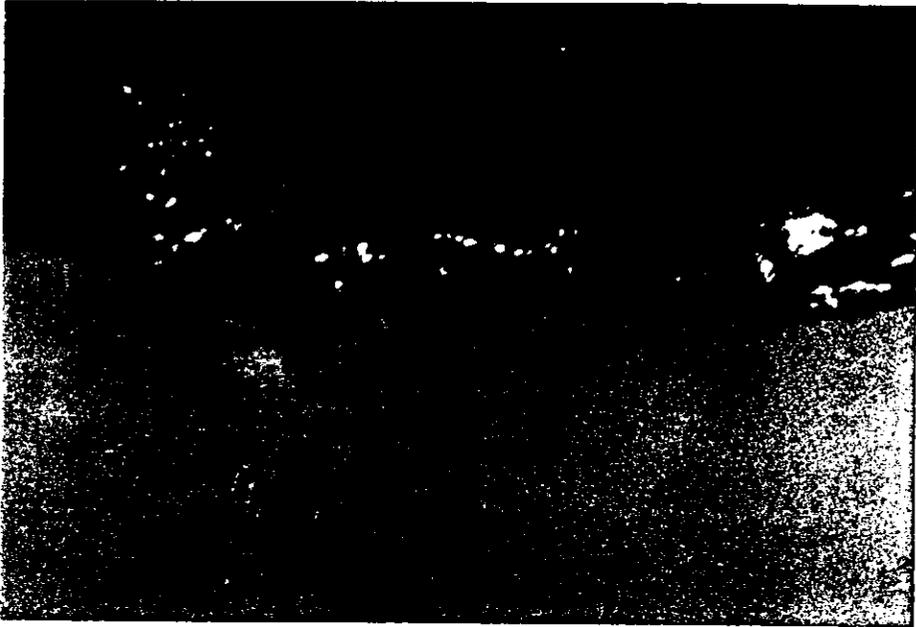


Foto 3. Ampl. 32X

En la Foto 3 se muestra tiene un desgaste por deformación plástica, que se puede presentar en dos formas, las cuales son: depresión o incremento del filo que provoca un control de viruta, y un acabado superficial deficiente. Se corre el riesgo de un excesivo desgaste en incidencia, lo que provocaría una rotura de la plaquita.

El desgaste es originado por una temperatura de corte demasiado elevada junto con una alta presión; esto se presentó por una mala selección en el tipo de fluido de corte utilizado, pues se usaron lubricantes a muy altas velocidades de corte, siendo necesario algún refrigerante el que asegurara una temperatura controlada durante el proceso. Como ya se mencionó en el Capítulo 5 los lubricantes no son muy recomendados a altas velocidades de corte puesto que estos no entran en contacto directo con la herramienta y la pieza de trabajo.

Se puede solucionar este tipo de desgaste seleccionando una calidad de plaquita de mayor dureza con más alta resistencia a la deformación plástica, si se desea no usar refrigerantes

por cuestiones de carencia de ellos, o bien si los materiales son propensos a la oxidación excesiva así como a la tendencia a los cambios bruscos de temperaturas.

En el caso de la deformación por presión se recomienda reducir la velocidad de corte. y para el caso de incremento, reducir el avance.

CRATERIZACIÓN

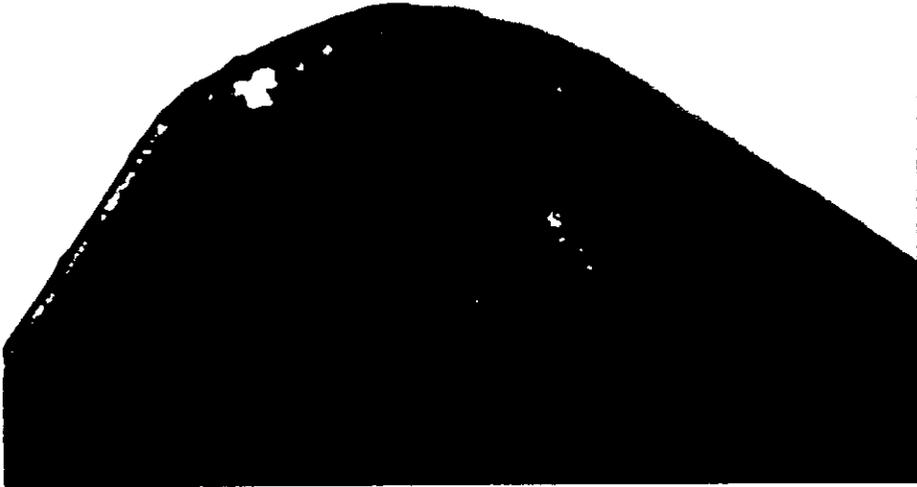


Foto 4. Ampl. 32X

La craterización excesiva que se muestra en la fotografía provoca un filo débil. En este caso el filo de corte se rompe por la parte posterior, y por lo consiguiente resulta un deficiente acabado superficial.

El desgaste es causado por difusión debido a temperaturas de corte elevadas, con lo cuál se suelda a la punta de la herramienta el material a maquinar; y posteriormente con las fuerzas de corte a que esta sometida la herramienta se arranca este material soldado en la punta, resultando por consiguiente la craterización en el ángulo de desprendimiento de la herramienta.

Se puede solucionar seleccionando una calidad de material base más tenaz con recubrimiento de carburo de tungsteno y cobalto para aumentar su resistencia a las altas temperaturas y a la abrasión, pues como ya se mencionó este tipo de recubrimientos mejoran mucho las propiedades de los aceros rápidos. También puede seleccionarse una

plaquita de configuración adecuada (positiva) para disminuir con esto los esfuerzos cortantes a los que está sometida la herramienta, y poder dar también un desahogo más natural de las virutas originadas en el proceso de maquinado. o bien, en su defecto, reducir primero la velocidad de corte para disminuir la temperatura; una vez que se obtuvo esto, se reduce la velocidad de avance. Con estas medidas puede reducirse sustancialmente el desgaste en cuestión.

FILO DE APORTACIÓN

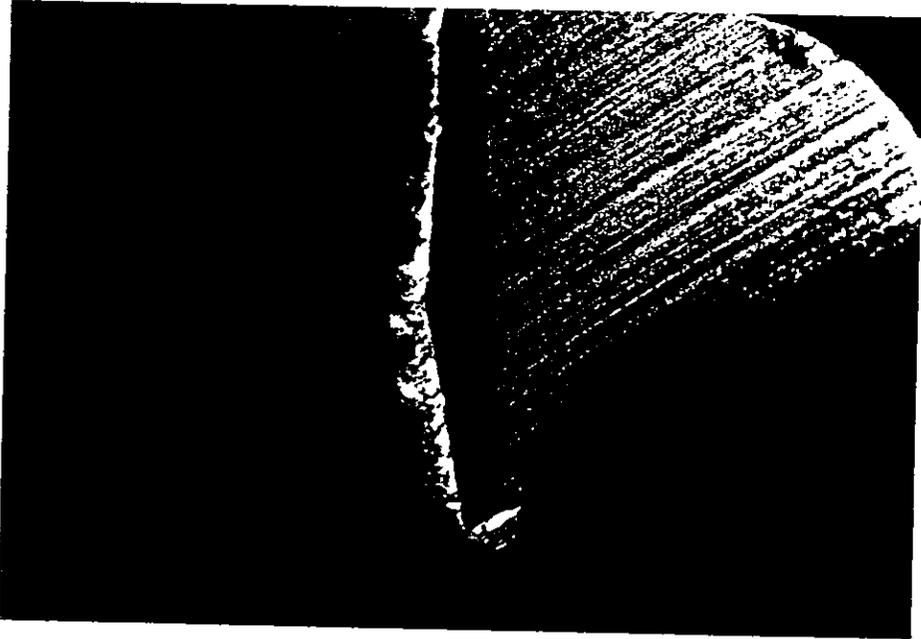


Foto 5. Ampl. 16X

En la Foto 5 se indica un filo de aportación, el cual provoca un acabado superficial deficiente y una rotura del filo de corte, cuando se arranca dicho filo.

El material de la pieza se suelda a la herramienta como se mencionó en lo anterior, a diferencia de que el material que es aportado en la punta y por las bajas velocidades de corte a la que es trabajada aquella no se arranca dicho material, dando por consecuencia un muy mal acabado de la pieza debido a una baja velocidad de corte, una configuración de corte negativa, o el uso de un material blando, como, por ejemplo, ciertos aceros inoxidable o aluminio puro.

Para contrarrestar este efecto se recomienda aumentar la velocidad de corte o cambiar a una plaquita de corte para calidades de metal duro, como son los cerments con base de carbonitruros metálicos, de los cuales se describen sus propiedades en lo anterior (pag. 37). También es viable seleccionar una geometría positiva, o incrementar la velocidad de corte

en grandes proporciones. Si la vida de la herramienta resulta corta, aplicar grandes cantidades de refrigerante, seleccionándolo de acuerdo con el material de la pieza y la herramienta..

MARTILLADO DE VIRUTAS



Foto 6. Ampl. 16X

En la Foto 6 se muestra un desgaste por martillado de virutas. Se observa que la parte del filo de corte que no está en contacto con la pieza, se daña a causa del martillado de las virutas. Tanto la cara superior como el soporte de la plaquita pueden sufrir daños.

Esto es ocasionado porque las virutas tienen una longitud excesiva y son desviadas hacia el filo de corte, causando con esto un golpeteo y contacto continuo de la viruta sobre la herramienta, la cual tiene una muy alta temperatura, y ello es un factor determinante para causar el desgaste, sin olvidar también el constante contacto. Por todo lo anterior se origina esta forma de desgaste.

Para este caso se recomienda modificar ligeramente el avance, seleccionar otra geometría de plaquita con un ángulo de salida más pronunciado, para evitar el contacto con la herramienta. También se puede seleccionar una calidad de material más tenaz para que la

viruta se pueda romper y desalojar más fácilmente evitando con esto que se forme continua, la que es por lo general la causa de este tipo de desgaste.

ROTURAS



Foto 7. Ampl. 18X

Se puede apreciar en la foto 7 unas pequeñas fracturas (roturas) del filo de corte, causantes de un acabado superficial deficiente y un desgaste en incidencia excesivo de la herramienta.

Esto es consecuencia de una calidad demasiado frágil de material de que esta constituida la herramienta, con lo cual el material a maquinar rompe directamente la herramienta por no cumplir con los requisitos básicos expuestos anteriormente ver (herramientas de corte para centros de maquinado); también puede ser a consecuencia de una geometría de plaquitas demasiado débil, como son ángulos muy agudos, provocando con esto concentraciones de esfuerzos en la herramienta. Esta no llega a resistir esas fuerzas, ocasionandose con esto la rotura.

Se recomienda seleccionar una calidad más tenaz o seleccionar una plaquita con una geometría más robusta, es decir un chaflán más grande. aumentar la velocidad de corte o elegir una geometría positiva a fin de reducir el avance al empezar el corte.

FISURAS TÉRMICAS



Foto 8. Ampl. 18X

Las pequeñas fisuras perpendiculares al filo de corte, mostrado en la foto 8 ocasionan una rotura y un acabado superficial deficiente.

Estas fisuras térmicas debidas a variaciones de temperatura son causadas por un mecanizado discontinuo o un suministro de refrigerante desigual o insuficiente en este caso particular por la falta de energía eléctrica en el centro de mecanizado, con lo que se interrumpió la aplicación del refrigerante y se siguió el proceso, originando así un incremento en la temperatura tanto en la herramienta como en la pieza de trabajo. Ello ocasiona un choque térmico con lo cual se daña la herramienta con fisuras y la pieza se curva o flexiona.

Para solucionar el problema puede seleccionarse una calidad más tenaz con mayor resistencia a los cambios bruscos de temperatura. El refrigerante debe aplicarse en

abundancia, o de no ser así, mejor no se debe usar puesto que se corre el riesgo de que ocurran los problemas anteriormente descritos.

FRACTURA EN TROZOS

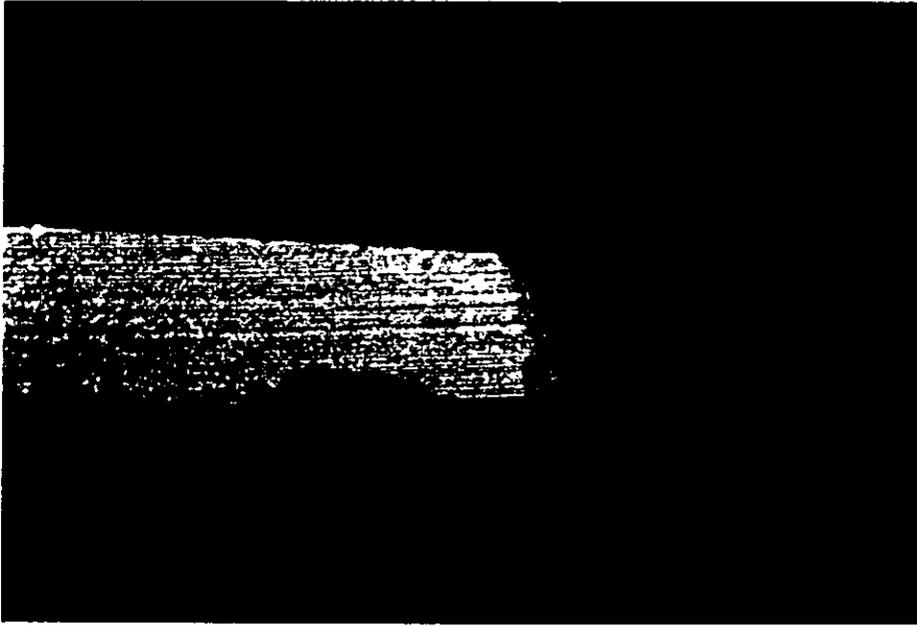


Foto 9. Ampl. 32X

Como se puede apreciar en la Foto 9 este tipo de desgaste es una fractura en trozos de la herramienta, causada por una calidad demasiado frágil del inserto o una geometría demasiado débil, al igual que el desgaste por rotura descrito con anterioridad.

Para corregir este efecto se debe reducir el avance con la finalidad de disminuir las fuerzas de corte generadas en el maquinado. O bien elegir una calidad de material más tenaz, pues el material del que está hecha la herramienta es más propenso a fallar si existen vibraciones o impurezas en el material a maquinar, que por su excesiva dureza es más frágil y por último utilizar una plaquita con ángulo de corte mayor para, disipar los esfuerzos y distribuirlos mejor en una área de contacto mayor, pues como ya mencionamos, las fuerzas de corte que actúan sobre la herramienta son de gran trascendencia para que se origine este tipo de desgaste.

FISURAS EN FORMA DE PEINE Y DESCONCHADOS

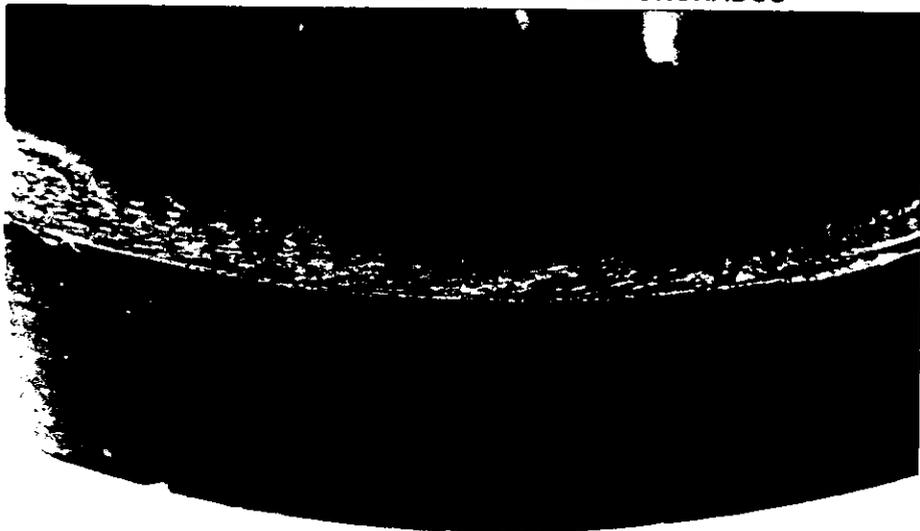


Foto 10. Ampl. 16X



Foto 11. Ampl. 32X

Las fisuras en forma de peine, como se muestra en la Foto 10, se producen por los cambios de temperatura a los que está sometido el filo durante el corte; nuevamente es incorrecta la distribución del refrigerante, aplicado puntualmente a la pieza de trabajo y no a la herramienta. Una correcta aplicación del refrigerante es cuando se aplica el mismo, tanto a la herramienta como a la pieza, pues de lo contrario pueden existir gradientes de temperatura en ciertas zonas de la herramienta o de la pieza ocurriendo por consiguiente la falla descrita. En un proceso de maquinado de duración excesivo las fisuras en forma de peine pueden provocar desconchados (Foto 11.) en la arista de corte. La formación de fisuras en los filos depende de la velocidad de corte, de la calidad de metal duro, de la geometría de filo y del avance.

Se recomienda en este caso emplear un metal duro más resistente al desgaste, como puede ser una herramienta de Cermet de carburo de titanio con níquel y adición de molibdeno, con lo cual se aumenta su resistencia al desgaste aparte de mejorar mucho sus propiedades con la adición de estos elementos. Por ejemplo, la aplicación de más refrigerante debido a la mejora en su resistencia por choques térmicos, como se mencionó con anterioridad aun trabajando y aumentando la velocidad de corte.

FISURA TRANSVERSAL



Foto 12. Ampl. 32X

Las fisuras transversales, Foto 12 son fenómenos de fatiga en el material de corte. Principalmente se producen debido a los esfuerzos de golpe durante el maquinado. A este respecto, el tipo de contacto inicial de filo de corte asume especial importancia. Para corregir estas fisuras se puede utilizar un metal duro (cermet revestido, diamante) que sea más resistente a la fatiga. Se puede también manejar la opción de involucrar un material más tenaz si no se quiere sustituir la herramienta con la finalidad de que la misma no sea sometida a esfuerzos tan grandes que ocasionen el rayado transversal. Otra opción más puede ser reducir el avance igualmente, para reducir las fuerzas generadas en el corte, o aumentar la velocidad de corte y reducir la profundidad de corte. Otra opción sería modificar el ángulo de ataque. Como se puede apreciar, en este tipo de desgaste hay más opción de utilizar parámetros para corregir esta forma de desgaste.

6.7 ESTIMACIÓN DE VIDA ÚTIL DE HERRAMIENTAS

Después de un periodo prolongado de operación, una herramienta de corte deja de comportarse satisfactoriamente como consecuencia del desgaste. Los criterios de falla pueden incluir la pérdida de exactitud en las dimensiones, excesivas irregularidades superficiales o aumento de las necesidades de potencia. En casos extremos, la falla puede ser consecuencia de la pérdida física del borde cortante. El tiempo real de corte de la herramienta acumulado antes de la falla, se llama vida de la herramienta y se puede expresar en minutos. Después de la falla la herramienta debe ser reacondicionada. Las fallas en la herramienta implican entonces pérdida de producción por el periodo de paralización de la máquina, además del costo de reacondicionamiento.

A continuación se presenta el siguiente estudio realizado, acerca de la vida útil de las herramientas utilizadas en un proceso de fabricación de una pieza trabajada en aluminio (en un centro de maquinado). Tal estudio fue efectuado con el fin de conocer el número aproximado de ciclos de vida de las herramientas. La temática que se siguió fue la de llevar una bitácora detallada de las diferentes herramientas empleadas desde el principio del proceso y hasta el momento de ser sustituidas, cuando dichos útiles ya no cumplían con las especificaciones requeridas.

Dicho periodo de estudio fue realizado de noviembre de 1996 a enero de 1997. Se utiliza la letra H para identificar el número de herramienta de la cual se trate.

PERIODO DE ESTUDIO: Noviembre 1996 a Enero 1997

H1 Broca, diám. 4.8 mm con revestimiento de nitrotitanio.

Precorte rimado diám. 5.0 mm

La vida de esta herramienta es de 20,000 ciclos sin reafilado, y se acorta una vez afilada quedando en 10,000 ciclos.

H2 Formador M6, con recubrimiento de cromo.

formador de roscas M6x1.

Esta herramienta tiene como durabilidad 5,000 ciclos, dependiendo en gran medida de su precorte, el cual es controlado también por su vida útil.

H3 Cortador, diám. 63.0 mm. con insertos de diamante.

Fresado de bridas.

Una vida útil concreta no se obtuvo, por diversos motivos, entre ellos, el frecuente cambio a insertos de carburo, como consecuencia de choques con dispositivos, etc. Se estima una vida útil mayor a 40,000 ciclos. No obstante existe un seguimiento continuo cuando se cambia a cortador con insertos de carburo; se ha calculado una vida que se encuentra entre los 350 hasta los 500 ciclos. Con este último dato de ciclos, el riesgo de rebaba y planicidad es alto.

PARA LAS SIGUIENTES HERRAMIENTAS EXISTE UNA POSIBILIDAD DE AMPLIAR SU VIDA ÚTIL

H4 Rima, diám 5.0 mm.

Las tolerancias de maquinado de este útil son de 5.020 mm a 5.038 mm. Es decir, un rango de 0.018 mm. La rima nueva deja una dimensión ya centrada de 5.033 a 5.035 mm. Esto último dentro de tolerancia, aunque cargadas al máximo. Si esta rima no se lapeara (o incluso lapeada a 5.032 mm) subiría aproximadamente un 40% su durabilidad, y esto contando con una buena concentración en soluble, según se requiera, así como caída del mismo.

H5 Rima de carburo, diám. 5.0 mm. Rimado de diam. 5.0 mm. E8.

Esta herramienta ha tenido diversos problemas tales como:

Lapeado inadecuado. La que provoca un diámetro chico.

Desgaste prematuro, Ocasionado por una mala concentración de soluble y mala caída del mismo.

Rotura por piezas mal colocadas.

Rotura por cambio (no posible) de posición en magazine.

Lo antes citado repercute en un registro impreciso de su durabilidad real. Este útil se encuentra aún en observación, cuidando tanto concentración como dirección de soluble y su precorte adecuado. Actualmente se maneja una vida de 15,000 ciclos, según los registros en bitácora.

H6 Broca escalonada de carburo, diám. 5.5/6.25 mm.

Núcleos para roscas M6.

Tiene una vida promedio de 5,000 ciclos; no obstante esta broca al llegar aproximadamente a la mitad de su vida (2,000-2,500) ocasiona una operación manual de rebabeo en salida de cuerda, la cual no repercute en volumen de producción.

Se continúan estudiando posibles efectos de esta broca en rotura prematura de formador M6 después de la mitad de su duración.

H7 Cortador T diám. 21.0 mm. Premaquinado, diám. 100.0 mm.

Esta herramienta tiene 1,500 ciclos de vida útil; se ha notado que un 20% de los registros correspondientes al cortador no concuerdan con su vida ya calculada, y se está dando seguimiento para verificar:

Cambios no registrados de filos.

Ampliación de ciclaje igualmente no registrados.

Posibilidad de aumento de vida útil.

H8 Fresa forma "T"

Es otra con la posibilidad de aumento en su vida y de ello se tiene un seguimiento.

H9 Cortador vertical.

Con la misma posibilidad que la anterior.

H10 Cortador vertical de carburo, diám. 12.0 mm .

Fresado a perfiles de brida.

En bitácora se tiene un solo registro de cambio para esta herramienta. Evaluando así un ciclaje de vida de 15,000 ciclos. Sin embargo, este cambio se hizo por vibrado en perfil y no por desafilado: por ello existe la posibilidad de un aumento, el cual está en seguimiento.

H11 Broca de carburo de tres filos, diám. 6.5 mm.

Barrenado, diám. 6.5 mm.

Su estudio reflejó una vida de 9,000 ciclos, quedando en observación por registro de roturas; no obstante, las roturas coinciden en ciclaje, variando únicamente 500 ciclos.

H12 Boring, diám 100.0 mm. h8 tres insertos

Herramienta especial con precorte y chaflán de carburo y acabado de diamante.

Torneado, diám 100.0 mm.

Para esta herramienta se manejan dos vidas útiles: la primera referida al inserto de diamante, cuya durabilidad es mayor que 40,000 ciclos. La segunda se relaciona con los insertos de carburo, los cuales pueden tener una vida de 3,000 ciclos y son manejados por pantalla de datos en máquina, quedando su seguimiento por bitácora de la vida del inserto de diamante.

CONCLUSIONES

Durante la investigación acerca del desgaste que sufren las herramientas de corte en centros de maquinado, apreciamos la importancia que tienen ciertas materias académicas tales como: Tecnología de materiales, Procesos de manufactura, Procesos de conformado de materiales, Procesos de corte de materiales. Sin olvidar, en conjunto los conocimientos adquiridos durante la formación académica en la rama de **ingeniería mecánica**, contando además con el gran apoyo y asesoría proporcionada por técnicos y operadores especializados en el área. Es indudable que para asimilar y desarrollar cualquier tema relacionado con la carrera de ingeniería, es necesario haber adquirido los conceptos básicos en el estudio de una tecnología. Con esto se capta un panorama más amplio de la gran importancia que tiene el enfatizar el aprendizaje de todas las materias durante la carrera. Así mismo, estar consientes de la utilidad de la actualización, tanto tecnológica como académica, para tener un buen desempeño en el campo de la ingeniería, y poder así ser profesionistas competitivos y actualizados.

Por otra parte se pudo concluir que uno de los factores que intervienen directamente en la productividad, es el desgaste que sufren las herramientas, ya que el tiempo requerido para sustituir un dispositivo de corte en caso de tener piezas fuera de especificaciones y tolerancias, puede afectar al lote total de piezas, reflejándose en la economía de la empresa, además de disminuir la tasa de utilización de la máquina; esto provoca altos costos en la producción. Actualmente varias empresas evitan este problema con la implantación de sistemas modulares y con la utilización de nuevos materiales y tipos de herramientas, así como preajuste y calibración de las mismas. Con ello se eliminan las siguientes operaciones tradicionalmente efectuadas durante el proceso: Verificación continua de las dimensiones obtenidas durante el maquinado (con tal sistema, esta acción se lleva a cabo únicamente en la primera pieza), calibración, sustitución y reajuste en caso de medidas fuera de tolerancia (debido a un desgaste prematuro de la herramienta), montaje, fijación y reajuste de los cartuchos portainsertos e insertos sobre la máquina, y considerando que el maquinado de las piezas requiere de más de una operación. La eliminación de las actividades mencionadas

anteriormente conduce a la optimización del tiempo productivo de la máquina-herramienta CNC, cuyo costo por hora es elevado. Prácticamente se reduce y elimina la posibilidad de error de lectura en la medición de los diámetros obtenidos en la pieza, cuando ésta se encuentra todavía sobre la máquina, disminuyendo la cantidad de obreros para dicha operación.

De acuerdo con lo anterior, es indudable que una deficiente selección o aplicación de una herramienta es muy nocivo para el proceso, debido a los altos costos que provoca. Para la selección de una herramienta se deben tener en cuenta muchos factores, que van desde el tamaño de lote de piezas, hasta las tolerancias exigidas por el cliente. Por ejemplo, si se trata de un lote muy grande, conviene invertir en una herramienta que durante todo el proceso no tenga que ser reemplazada, con el fin de mantenerlo estable. De lo contrario, al momento de sustituir la herramienta se corre el riesgo de que el proceso se convierta en inestable, además de perder un tiempo considerable en cada operación de cambio, lo que sumado puede significar hasta días de pérdida de tiempo en un proceso de producción de gran magnitud, acarreado con ello un costo total más elevado en la producción final. Por consiguiente, el desgaste de la herramienta afecta directamente al proceso.

Con respecto al estudio de vida útil de herramientas de corte en centros de maquinado que se presentó en el Capítulo 6, obtuvimos como resultado que un 73 % de las herramientas analizadas tienen una vida útil determinada; es decir, estas herramientas no pueden ser reutilizadas en ningún proceso, ni aún siendo reafiladas, por lo cual se desechan. Para el 27 % restante de las herramientas analizadas existe una posibilidad de ampliar su vida útil por medio de un reafilado. Es decir, cuando dichas herramientas caen fuera de especificaciones y tolerancias se les somete a un proceso de reafilado y pueden seguir siendo utilizadas en otros procesos con menos exigencias en parámetros (tolerancias y especificaciones), quedando así dichas herramientas con una durabilidad relativa.

Por otra parte, lo que sugerimos hacer para utilizar al máximo la vida útil de herramientas de corte, es efectuar un detallado seguimiento continuo durante el proceso de maquinado y

hacer registros de herramientas descargados en bitácoras, así como una minuciosa búsqueda de causas de cambios no registrados.

Por lo anterior, ponemos el presente trabajo a la disposición de quien pueda resultarle útil, esperando así poder contribuir al mejoramiento, tan necesario en nuestros días, de la productividad y desarrollo tecnológico en procesos de fabricación en la **Industria de Manufactura**, que es vital para México.

BIBLIOGRAFIA

"MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA PARA INGENIEROS"

Lawrence E. Doyle,

Carl A. Keyser,

James L. Leach,

George F. Schrader,

Morse B. Singer.

Prentice-Hall Hispanoamericana

1988 3ª edición.

"ACEITES DE CORTE Y ADITIVOS INDUSTRIALES"

Benito Vidal R.

Editorial Gustavo Gili

Biblioteca del Mecánico

1974 9ª edición.

"MANUAL DEL INGENIERO MECANICO (MARKS)"

Theodore Baumeister,

Eugene A. Avallon.

McGraw-Hill

1982, 8ª edición.

"TOOL ENGINEERS HANDBOOK"

Frank W. Wilson,

Philip D. Harvey.

McGraw-Hill.

1959, 2ª edición

"COMPUTER NUMERICAL CONTROL"

Herman W. Pollack.

Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

1977 5ª edición.

"MAQUINAS HERRAMIENTAS CON CONTROL NUMERICO"

Jean Vergnas.

Urmo S.A.

"HERRAMIENTAS DE TORNEAR"

Sandvik Coromant. (Manual-93/94)

**"FUNDAMENTOS DEL CORTE DE METALES Y LAS MAQUINAS
HERRAMIENTAS"**

Geoffrey Boothroyo.

McGraw-Hill-Interamericana

1982, 3ª edición

"ESTUDIO GENERAL DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE"

Roberto Albaizar G.

Dossat S.A. Madrid

1964

"IMPORTANCIA DEL DESGASTE EN DISEÑO"

Charles Lipson.

Herrero Hermanos

Prentice-Hall Hispanoamericana

1977, 4ª edición

"MAQUINADO DE METALES CON MAQUINAS HERRAMIENTAS"

John L. Feirer,

& E.E. Tatro.

editorial Continental México.

1965, 1ª edición

"METALS HANDBOOK"

Bolz Roger William

McGraw-Hill. New York (Tomo 16)

1958 3ª Edición.

"HERRAMIENTAS DE CORTE"

Blanpain Edward.

Gustavo Gili Barcelona, España.

1962 2ª edición ampliada

"MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACION"

E. Paul DeGarmo

Editorial Reverté, Argentina.

1967 2ª edición.

"PROCESOS DE MANUFACTURA-VERSION SI"

B.H. Amstead,

& Philip F. Ostwald

Cía. editorial Continental, México.

1988 1ª edición

"LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES"

Donald R. Askeland

Grupo Editorial Iberoamérica, México.

1987 1ª edición.