

68
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

SELECCION DE MAQUINAS-HERRAMIENTA CNC
UTILIZANDO EL METODO DE ELEMENTO FINITO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

(AREA MECANICA)

P R E S E N T A N :

OLOARTE MOLINA ALFONSO

PARDO MONRROY DONUSTANO AGUSTIN



DIRECTOR DE TESIS: ING. ALVARO AYALA RUIZ

MEXICO, D. F.

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

276945



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central

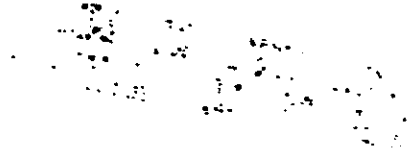


UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

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 mi mamá:

*Porque siempre me has dado todo lo mejor de tu amor,
tiempo y apoyo para ayudarme a lograr mis objetivos.*

A mi papá:

*Por enseñarme a tener la fuerza de enfrentarme
a la vida para seguir siempre adelante.*

A mis hermanos Aitxa, Aida y Alejandro:

*Por su apoyo y por que gracias a su ejemplo
me ha sido más fácil seguir el camino.*

A todos mis amigos y compañeros:

Por su afecto y por estar a mi lado durante toda la carrera.

A Arlenn:

Por su compañía y apoyo durante todo este tiempo.

A Dios:

*Porque siempre has demostrado estar junto a mí
y ha sido tu voluntad el permitirme estar aquí.*

Alfonso.

*A mis padres:
Por toda su confianza y apoyo que he recibido
durante estos años de esfuerzo y preparación.*

*A mis hermanas Ana y Elizabeth:
Por su apoyo moral que siempre las ha caracterizado.*

*A mi novia Georgina:
Por su paciencia y comprensión.*

*A una amiga muy especial:
Por su apoyo, tiempo y esfuerzo que me
ofreció durante la carrera.*

*A todos mis amigos y compañeros:
Por hacer más agradable mi estancia en la Universidad.*

*A Dios:
Porque siempre estás junto a mí y me das
la oportunidad de seguir adelante.*

Agustin.

*Con cariño y respeto a nuestra Universidad y Facultad de Ingeniería:
Por brindarnos la oportunidad de recibir una formación profesional.*

*A todos nuestros profesores:
Por transmitirnos sus conocimientos y experiencia*

*Al Ing. Alvaro Ayala:
Por todo el tiempo y apoyo que nos brindó durante
la elaboración de esta tesis.*

Alfonso y Agustin.

Índice.

INTRODUCCIÓN.	1
CAPITULO 1.	
CONTROL NUMERICO POR COMPUTADORA.	
1.1 HISTORIA DEL CONTROL NUMERICO POR COMPUTADORA.	3
1.2 DEFINICIONES.	
1.2.1 Control numérico (CN).	8
1.2.2 Control numérico por computadora (CNC).	8
1.2.3 Unidad de control de máquina (MCU).	8
1.2.4 Máquina-herramienta CNC.	8
1.2.5 Códigos de programación en CNC.	9
1.2.5.1 Códigos G.	9
1.2.5.2 Códigos M.	9
1.2.6 Control numérico directo (DNC).	9
1.3 PROCESO TRADICIONAL DE SELECCIÓN DE MAQUINAS- HERRAMIENTA CNC.	10
1.4 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS HERRAMIENTA CNC.	12
1.4.1 Fresadoras.	13
1.4.2 Centros de maquinado.	14
1.4.3 Tornos.	15
1.4.4 Cortadoras láser.	15
1.4.5 Rectificadoras.	16
1.4.6 Electroerosionadoras.	17
1.4.7 Cortadoras por chorro de agua.	18
1.4.8 Punzonadoras.	19

1.5	LA MAQUINA CNC, SU CONFIGURACION.	20
1.5.1	El motor principal.	20
1.5.2	La transmisión de potencia al husillo principal.	20
1.5.3	Husillo portaherramienta.	21
1.5.4	Estructura o "casting".	21
1.5.5	Guías, bancada y mesa.	22
1.5.6	Intercambiadores de herramientas.	23
1.5.7	Motores para movimiento de ejes.	23
1.5.8	Equipo periférico.	24
1.5.8.1	Mesas rotatorias.	24
1.5.8.2	Indexadores.	24
1.5.8.3	Extractores de viruta.	25
1.5.8.4	Alimentadores de material.	25
1.6	EL CONTROL DE CNC.	25
1.6.1	Movimientos y ciclos de control.	26
1.6.1.1	Movimientos punto a punto.	26
1.6.1.2	Movimientos de trayectoria continua de la herramienta.	26
1.6.1.3	Sistemas de ciclo abierto.	27
1.6.1.4	Sistemas de ciclo cerrado.	27
1.6.2	Establecimiento de posición por coordenadas cartesianas.	28
1.6.3	Ejes de movimiento en máquinas CNC.	29
1.6.4	Modos de posicionamiento de la herramienta incremental y absoluto.	31
1.6.4.1	Posicionamiento incremental.	31
1.6.4.2	Posicionamiento absoluto.	31
1.6.5	Almacenamiento y programación.	31
1.6.5.1	Programación a pie de máquina.	31
1.6.5.2	Programación externa.	31
1.6.5.3	Programación asistida por computadora.	32
1.7	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	32
1.7.1	Ventajas de las máquinas CNC.	32
1.7.2	Desventajas de las máquinas CNC.	33

CAPITULO 2.
HERRAMIENTAS DE CORTE.

2.1	HERRAMIENTAS PARA OPERACIONES DE BARRENADO Y FRESADO.	34
------------	--	-----------

2.1.1	Herramientas para operaciones de barrenado.	35
2.1.1.1	Brocas helicoidales.	35
2.1.1.2	Brocas de centros.	36
2.1.1.3	Brocas con vena de refrigeración.	37
2.1.1.4	Brocas de espada.	37
2.1.1.5	Brocas con insertos intercambiables.	38
2.1.1.6	Brocas de doble margen.	38
2.1.2	Herramientas para operaciones de corte posteriores al barrenado.	39
2.1.2.1	Mandrinado.	39
2.1.2.2	Rimado.	39
2.1.2.3	Machueleado.	40
2.1.2.4	Agrandado y acabado.	41
2.1.2.5	Avellanadores.	41
2.1.3	Herramientas para fresado de perfiles y operaciones de careado.	41
2.1.3.1	Cortadores verticales.	42
2.1.3.2	Cortadores para corte plano y frontal.	43
2.1.3.3	Cortadores verticales con insertos de carburo intercambiables.	43
2.2	MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE.	44
2.2.1	Acero para herramientas.	44
2.2.2	Carburos cementados.	45
2.2.3	Metales duros.	45
2.2.4	Cerámicas.	48
2.2.5	Nitruro de Boro cúbico.	49
2.2.6	Diamante policristalino.	49
2.3	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LOS CORTADORES VERTICALES.	50
2.3.1	Diseño en la geometría de la herramienta.	50
2.3.2	Relación operación – herramienta.	53
2.4	EL PROCESO DE CORTE Y SUS FUERZAS.	55
2.4.1	Formación de viruta.	56
2.4.1.1	Viruta continua.	57
2.4.1.2	Viruta continua con recrecimiento en la punta de la herramienta.	57
2.4.1.3	Viruta discontinua.	58
2.4.2	El corte ortogonal.	59
2.4.2.1	Determinación del ángulo del plano de desprendimiento.	60
2.4.2.2	Componentes de la fuerza de corte en el corte ortogonal.	61
2.4.3	Modelos de zona plana.	63
2.4.3.1	Modelo de Merchant.	63
2.4.3.2	Modelo de Oxley.	64
2.4.3.3	Proceso de corte con profundidad de corte no constante.	65
2.4.4	El corte oblicuo.	67

2.4.4.1	Los ángulos de incidencia en el corte oblicuo.	67
2.4.4.2	Relaciones para la velocidad en corte oblicuo.	70
2.5	PARAMETROS DE CORTE.	71
2.5.1	Maquinabilidad.	72
2.5.2	Velocidad angular.	74
2.5.3	Velocidad de corte o superficial.	74
2.5.4	Avance por diente.	74
2.5.5	Avance.	75
2.5.6	Profundidad de corte.	75
2.5.7	Ancho de corte.	75
2.5.8	Tasa de remoción.	75
2.5.9	Potencia requerida.	76
2.6	FACTORES QUE MODIFICAN LOS PARAMETROS DE CORTE.	76
2.6.1	Fluidos de corte.	77
2.6.1.1	Emulsiones.	77
2.6.1.2	Aceites.	78
2.6.1.3	Soluciones.	78
2.6.2	Fijación.	78
2.6.3	Rigidez de la máquina-herramienta.	79
 CAPITULO 3.		
ANÁLISIS DEL PROCESO DE CORTE EN CORTADORES VERTICALES.		
3.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	80
3.2	PROPUESTA DEL METODO DE SELECCIÓN.	81
3.3	ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.	83
3.3.1	Esfuerzo, definición.	83
3.3.2	Tensor de Esfuerzos.	83
3.3.3	Ley generalizada de Hooke.	84
3.3.4	Ecuaciones constitutivas.	85
3.3.5	Criterio del esfuerzo cortante máximo (Tresca).	86
3.3.6	Criterio de la máxima energía de distorsión (Von Mises).	87

3.4	LA TOLERANCIA COMO FUNCION DE LA FUERZA DE CORTE.	88
3.4.1	Tolerancias, definición.	88
3.4.2	Las tolerancias en el proceso de fresado y las fuerzas de corte.	90
3.4.3	Hipótesis.	90
3.5	METODOS CONVENCIONALES PARA MEDICION DE LAS FUERZAS DE CORTE.	90
3.5.1	Medición Hidráulica.	91
3.5.2	Medición neumática.	91
3.5.3	Medición eléctrica.	91
3.6	EL METODO DE ELEMENTO FINITO COMO HERRAMIENTA PARA LA DETERMINACION DE LAS FUERZAS DE CORTE.	92
3.6.1	El método de elemento finito, definición.	92
3.6.2	Análisis unidimensional.	94

CAPITULO 4.

PRESENTACION DE LA METODOLOGIA Y RESULTADOS.

4.1	PORQUE UTILIZAR EL METODO DE ELEMENTO FINITO.	101
4.2	CONSIDERACIONES Y SIMPLIFICACIONES.	103
4.3	METODOLOGIA.	104
4.3.1	Generación de los modelos geométricos de cortadores verticales.	104
4.3.2	Generación del modelo para solución con el método de elemento finito.	105
4.3.2.1	Modelo.	105
4.3.2.2	Sistema de coordenadas.	105
4.3.2.3	Material.	105
4.3.2.4	Cargas.	106
4.3.2.5	Restricciones.	106
4.3.2.6	Nodos, elementos y mallado.	107
4.3.2.7	Análisis.	108
4.3.2.8	Ventana de representación gráfica de resultados.	108
4.3.3	Obtención de la fuerza de corte resultante y el torque requerido.	109
4.3.4	Cálculo de la velocidad del husillo.	111

4.4	PRESENTACION DE RESULTADOS.	111
4.4.1	Modelos geométricos y de simulación.	112
4.4.2	Esfuerzos resultantes.	114
4.4.3	Desplazamientos resultantes.	118
4.4.4	Fuerzas y torques resultantes.	122
4.4.5	Parámetros de corte.	125
	CONCLUSIONES.	128
	APENDICE 1.	130
	APENDICE 2.	143
	BIBLIOGRAFIA.	146
	REFERENCIAS.	148

Introducción.

Una de las áreas de desarrollo de la Ingeniería Mecánica es en la rama del diseño y la manufactura. Dentro de esta amplia rama, el estudio de los procesos de corte de materiales tiene una enorme aplicación en la industria de México. Ante la ahora extensiva utilización de tecnologías como el CNC (Control Numérico por Computadora) y de sistemas como el CAD/CAM (Diseño Asistido por Computadora/Manufactura Asistida por Computadora), el ingeniero de manufactura tiene hoy a su alcance valiosas herramientas para mejorar los procesos productivos de la manufactura, la calidad de las piezas procesadas, los tiempos de producción y ayudar a disminuir costos de operación o pérdidas por material terminado rechazado.

Para obtener los beneficios de estas herramientas tecnológicas, el ingeniero de manufactura debe tener la capacidad para aprovechar óptimamente los recursos disponibles o en su caso, tener una base sólida para seleccionar el equipo, máquina-herramienta o sistema que según sus especificaciones, satisfaga lo mejor posible las necesidades de la producción.

Es precisamente en el proceso de selección de maquinaria que el ingeniero de manufactura y/o el asesor debe recurrir a la experiencia de casos similares para determinar si las especificaciones de la máquina-herramienta cumple con las necesidades de manufactura. Pero muchas veces la experiencia no resulta ser suficiente para la evaluación de las opciones disponibles y para tomar una decisión correcta. Este problema se agudiza aún más el caso de selección de una máquina-herramienta CNC, ya que actualmente en México cuando una mediana empresa adquiere una máquina de este tipo, es la primera vez que decide o esta en posibilidad de acceder a esta tecnología. Por esto es muy común encontrar en la industria nacional, maquinaria instalada que no se utiliza debido a que no cumple con las características que se esperaba al momento de la compra o en el caso contrario, máquinas de gran capacidad que se desaprovechan en operaciones sencillas o que requieren de potencia y desempeño mucho menor a la que es capaz de proporcionar la máquina.

Una empresa mexicana (por razones comerciales no se proporciona el nombre) que se dedica a la consultoría y distribución de máquinas-herramienta CNC se ha percatado que aproximadamente el 80% de los compradores potenciales de máquinas fresadoras y centros de maquinado requieren que se les especifique la capacidad óptima de la máquina para que cumpla con los requerimientos de sus procesos de corte. Aún en grandes empresas dedicadas a la industria metal-mecánica existe un notorio desconocimiento de las características que debe

tener una máquina CNC, se desconoce como influyen características como la alta velocidad en el husillo, la elevada potencia o el diseño antivibración para optimizar los parámetros de corte y mejorar con esto la calidad del maquinado y elevar la productividad.

Por otro lado, esta empresa cuenta con una línea de herramientas de corte que han demostrado tener excelente desempeño para el maquinado con CNC utilizándolas bajo los parámetros que especifica el fabricante; por lo que se desea integrarlas a la máquina durante la venta para asegurarse que se utiliza el herramental adecuado y así conseguir el desempeño que se ha determinado de la máquina para el proceso de corte requerido.

El objetivo de la presente tesis es proponer un método para la selección de máquinas-herramienta CNC para procesos de fresado vertical (Centros de maquinado o fresadoras CNC) que tome en cuenta las características más importantes de la máquina; como el torque y la potencia requerida, la cual se obtiene mediante el modelado, solución y simulación de las condiciones de operación de cortadores verticales utilizando un sistema de solución por Elemento Finito, así como la configuración del diseño de la máquina, el tipo de control y los parámetros de corte como la velocidad del husillo o el avance de corte requeridos y otras características que se deben tomar en cuenta para tener una base sólida de información durante el proceso de selección de una máquina-herramienta CNC.

La tesis se divide en cuatro capítulos, de los cuales, en el capítulo 1 se exponen los fundamentos concernientes a las máquinas-herramienta CNC. En el capítulo 2 se explica el diseño, materiales, análisis de las fuerzas y parámetros de corte para las herramientas de corte utilizadas en los procesos de fresado. En el capítulo 3 se presenta el marco teórico referente a esfuerzos, criterios de falla, tolerancias en maquinado y la definición del método de Elemento Finito, para en el capítulo 4, presentar una metodología para la obtención del torque y potencia requeridos en diferentes operaciones de fresado, así como el comportamiento de los cortadores verticales durante el proceso de corte. Finalmente se presentan las conclusiones, bibliografía y apéndice de resultados.

Capítulo 1.

Control Numérico por Computadora.

1.1 HISTORIA DEL CONTROL NUMERICO POR COMPUTADORA.

Lo que conocemos como máquina-herramienta actualmente tiene su inicio en la época de la Revolución Industrial, en esta etapa se crea la necesidad de dispositivos y elementos manufacturados con mayor precisión y en materiales de mayor dureza. La primera máquina-herramienta de la época moderna que se ha documentado y reconocido como tal, data del año 1775, cuando John Wikenson construyó una máquina capaz de realizar taladrado horizontal.

Desde este momento se inicia la primera generación de máquinas-herramienta que comenzó con este tipo de sencillos mecanismos hasta maquinaria verdaderamente complicada para la manufactura de elementos utilizados en calderas, motores de vapor, mecanismos de la industria textil, producción en los inicios de la industria automotriz, etc.

Todo perfeccionamiento realizado a cualquier máquina, desde entonces y hasta la actualidad, corresponde a una necesidad específica de producción, por ejemplo, en 1798 Eli Whitney firmó un contrato con el gobierno de Estados Unidos de Norteamérica para producir 12,000 mosquetes, prometiendo que cada una de las partes de todos los mosquetes serían intercambiables. Este compromiso requería control en la manufactura como nunca se había necesitado antes. Whitney y sus socios diseñaron una complicada maquinaria accionada por agua para realizar procesos de forja, taladrado, rectificado, pulido y laminado en su planta de New Haven, Connecticut. Aunque se tenía el compromiso de producir los mosquetes en dos años, solo 500 fueron entregados en septiembre de 1801, y tomó más de ocho años para satisfacer el contrato. Cada vez que se realizaba un lote de mosquetes, los

supervisores tomaban algunos al azar y los desarmaban para después intercambiar las piezas y armarlos de nuevo. Estos se sorprendían cuando cada una de las piezas se ensamblaba en cualquier otro mosquete. Whitney desarrolló métodos de manufactura sumamente notables para su tiempo.

Los principios en manufactura utilizados por Whitney fueron implementados y mejorados por Samuel Colt y Elisha Root en su armería en Hartford, Connecticut. En 1855 no menos de 1400 máquinas habían sido instaladas en este lugar. Herramientas de corte, mordazas, dispositivos de mano y elementos de sujeción tuvieron sus raíces en estas instalaciones. La armería Colt producía pistolas con los más altos estándares de calidad y precisión en ese tiempo. Cabe mencionar que dos de sus empleados, Francis Pratt y Amos Whitney fundaron años después la firma que ha llegado a ser la mayor productora de máquinas-herramienta CNC.

Durante la segunda mitad del siglo diecinueve, importantes mejoras fueron implementadas en las máquinas-herramienta. Máquinas como la fresadora Miller (Fig. 1.1) fueron continuamente mejoradas para alcanzar mayores volúmenes de producción.

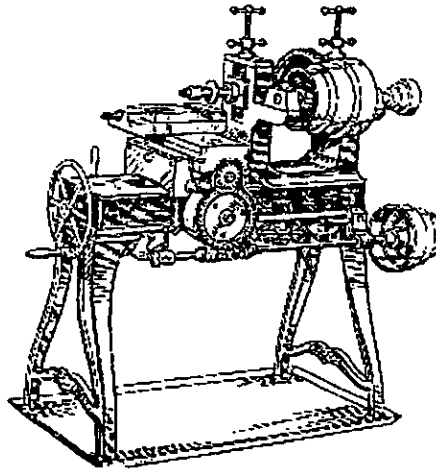


Figura 1.1 Fresadora Lincoln Miller con transmisión por bandas.

Para 1900, el grueso de los talleres mecánicos estadounidenses contenían las máquinas-herramienta más comunes, las cuales no diferían en funciones y forma de las usadas en la actualidad. La manufactura de automóviles al principio de siglo forzó el desarrollo de maquinaria todavía más complicada y precisa. Para 1914 la Ford Motor Company producía alrededor de un millón de autos de su famoso "modelo T" anualmente; esta impresionante producción habla de un desarrollo extraordinario en los métodos de producción utilizados.

La segunda generación consiste en toda la maquinaria que utiliza para su control relevadores, contactos lógicos, etc. Este tipo de máquinas permitió el desarrollo de la

producción automática de mediano-alto volumen. A esta generación pertenecen todas las máquinas con "alimentación automática" en uno o varios de sus ejes o carreras, donde el final y principio del movimiento se activan por algún tipo de relevador o sensor mecánico. También se utilizan motores auxiliares controlados con potenciómetros para variar la velocidad de avance y otro tipo de circuitos eléctricos de control (Fig. 1.2). Comienza el desarrollo de esta nueva forma de controlar una máquina-herramienta en las primeras décadas del siglo XX. Este método de automatización permitía una producción de hasta 20,000 piezas en un día, aunque sólo era posible fabricar piezas muy similares en la misma máquina, en las que sólo variara alguna operación o dimensión. Pero en esta etapa, la manufactura de prototipos o lotes pequeños debía realizarse en máquinas-herramienta con operación manual (Fig. 1.3).

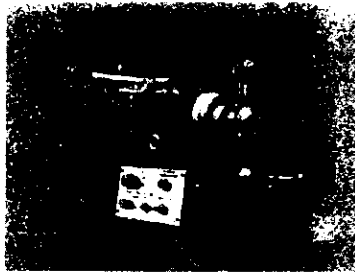


Figura 1.2 Alimentador longitudinal para mesa de Fresadora Bridgeport.

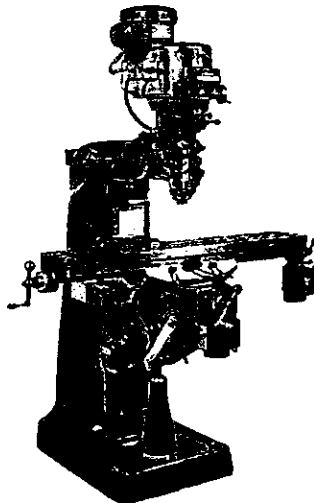


Figura 1.3 Fresadora Vertical Bridgeport.

La Manufactura Flexible marca el comienzo de la tercera generación de la manufactura moderna. La tercera generación marca no sólo la evolución sino una verdadera revolución en los procesos de manufactura.

La base de esta tercera generación es el Control Numérico (NC) y en su más reciente desarrollo, el Control Numérico por Computadora (CNC) que surge junto con el desarrollo explosivo de la electrónica digital y los Controladores programables (comúnmente llamados PC's).

La historia de los procesos de manufactura de precisión inicia con el proceso de desarrollo tecnológico de las computadoras, hidráulica, neumática y se ha ido perfeccionando a la par con otras disciplinas como la robótica.

Durante la guerra fría surge en la milicia norteamericana la necesidad de reducir el tiempo y aumentar la producción de elementos mecánicos de geometrías complicadas utilizadas en aeronaves de largo alcance. Se calculaba que el tiempo y costo de maquinado eran proporcionales a la velocidad de la aeronave y su tiempo de independencia. Con este objeto en 1940 la Parsons Corporation, al mando de John T. Parsons experimenta con una idea para generar una curva tridimensional con un taladro. Utilizando un controlador con cintas de papel perforado logra controlar el movimiento guiando un cortador en pasos pequeños describiendo una trayectoria tridimensional.

Con base en estos logros en 1949 la Fuerza Aérea Norteamericana comisiona al Laboratorio de servomecanismos del Instituto de Tecnológico de Massachusetts (M.I.T.) para desarrollar un prototipo de "máquina fresadora programable". Tras un intenso Trabajo se obtiene un taladro controlado en dos ejes con un sistema de posicionamiento punto a punto según un sistema coordenado. Para 1952, una máquina fresadora Cincinnati Hidrotel modificada, controlada en sus tres ejes es presentada y se concibe el termino de "Control Numérico".

En 1955 La Fuerza Aérea invierte \$35 millones de dólares para la fabricación de aproximadamente 100 máquinas de Control Numérico que incorporaban el control obtenido en los laboratorios del M.I.T. y para 1957 se ponen en funcionamiento exitosamente las primeras instalaciones industriales con tecnología de Control Numérico.

El M.I.T. continua en su línea innovadora y en 1962 presenta una nueva forma de ingresar programas al control de la máquina. Este sistema utilizaba como base una computadora que utilizando relaciones matemáticas asociadas a símbolos específicos o patrones de perforación en tarjetas, lograba controlar el movimiento. Este sistema se conoció como Herramientas automáticamente programadas APT "automatically programmed tools"

Para la década de los 70's, en la "International Machine Tool Show" en Chicago se presentan ya, variedad de máquinas, que eliminan la utilización de controles con procesamiento de información analógico como cintas, e incorporan controladores digitales programables, iniciando el auge comercial del Control numérico por Computadora (CNC) (Fig. 1.4).

El Control Numérico por Computadora, CNC (Computer Numerical Control) es la utilización de una computadora para gobernar los movimientos de una máquina herramienta e indicarle con que parámetros, es decir, con qué dimensiones, velocidad, geometría, etc. producir operaciones de maquinado en una pieza. La tecnología CNC puede ser utilizada en casi cualquier tipo de máquina-herramienta; incluyendo fresadoras, tornos, electroerosionadoras EDM (Electrical Discharge Machines), rectificadoras, máquinas de corte por láser, etc.

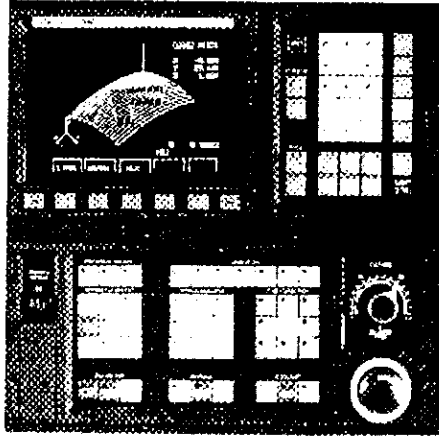


Figura 1.4 Control FANUC Series OTC.

Una vez dado el primer paso, los avances fueron rápidos. Las instalaciones hidráulicas se sustituyeron por circuitos en estado sólido. Se mejoraron los sistemas de almacenamiento de memoria, surgiendo el concepto de memoria ROM (read-only memory). Esto permitió la capacidad de almacenar líneas de programa o “ciclos enlatados” para facilitar la ejecución de operaciones comunes.

Al comienzo sólo se utilizaron coordenadas cartesianas. Más tarde se utilizaron coordenadas polares para definir los movimientos de la herramienta y aparece el Control Numérico Directo (DNC) que permite ejecutar programas que exceden la capacidad de memoria de la máquina, conectándola directamente a una computadora, la cual envía la información línea por línea, conforme se ejecuten en la máquina.

Desde el principio de los 80's se generaliza el uso de controles con interfaces gráficas “amigables”, así como la utilización generalizada de los sistemas CAD/CAM (Diseño Asistido por Computadora/Manufactura Asistida por Computadora) aunque estos sistemas existían comercialmente desde principios de los 70's

1.2 DEFINICIONES.

1.2.1 Control Numérico (CN).

Una máquina con Control numérico (CN) es aquella en que se controlan sus movimientos basándose en un código de letras, números y caracteres especiales. Un conjunto de instrucciones codificadas para ejecutar una o varias operaciones es llamado un programa. El programa es traducido a señales eléctricas que alimentan los motores de la máquina según la secuencia que se determina en el programa [A].

1.2.2 Control Numérico por Computadora (CNC).

Una máquina de Control Numérico por Computadora (CNC) es una máquina CN con la característica de tener una computadora interna. La computadora es comúnmente llamada la Unidad de Control de Máquina (MCU). De esa forma, las funciones son codificadas en la computadora en el momento de la fabricación. Estas no se borrarán al momento de apagar la máquina. La memoria de la computadora que contiene esta información es llamada memoria ROM (Read-Only Memory). El MCU generalmente contiene un teclado alfanumérico para la entrada manual de programas MDI (Manual Data Input) con códigos, o utilizando formatos conversacionales, es decir, por medio de ayuda amigable en pantalla para ingresar los datos importantes de un ciclo. Estos programas se almacenan en la memoria RAM (Random Access Memory) de la computadora, estos pueden ser revisados, editados y procesados por el control. Todos los programas que residen en memoria RAM son borrados al momento de apagar la máquina. Pero estos pueden ser almacenados en dispositivos auxiliares de almacenamiento como cintas magnéticas, discos magnéticos, chips de memoria en estado sólido (flash memory), en una unidad de disco duro, etc. Actualmente los controles no sólo se programan alfanuméricamente, sino que también se pueden programar en formato de operaciones o "eventos" también con gráficas de simulación en sólido de la pieza, recorridos de herramientas, detección de errores de programación, tiempos del ciclo de maquinado, administración de vida de la herramienta, etc [A].

1.2.3 Unidad de control de máquina (MCU).

Genera, almacena y procesa programas de CNC. La MCU contiene también el controlador de movimiento de la máquina, en forma de un software ejecutable.

1.2.4 Máquina-herramienta CNC.

Es una máquina-herramienta, cuyos movimientos responden a las señales de la Unidad de Control de la máquina. Estas señales se ejecutan de acuerdo a los parámetros que han sido ingresados por el programador u operador, es decir, con qué dimensiones, velocidad, geometría, etc. se efectuarán operaciones de maquinado en una pieza.

1.2.5 Códigos de programación en CNC.

Los códigos utilizados en la gran mayoría de los controles actuales, así como los formatos de programación se rigen por un estándar industrial denominado formato EIA (Electronic Industries Association). En los inicios del control numérico, la EIA se utilizaba como una norma que regía la cantidad de perforaciones y su secuencia en la elaboración de programas sobre cinta de papel. Existen diferentes tipos de códigos, aunque los más comunes son los que definen un evento (código G) y los que definen funciones adicionales o misceláneas (código M). Aunque actualmente la forma de almacenar la información de un programa, se realiza en unidades de disco magnéticos o con códigos binarios en chips de memoria, la estructura con que se organizan los códigos es la misma [B].

1.2.5.1 Códigos G.

Los códigos G son utilizados en el formato de programación EIA para especificar movimientos, estos son llamados "Códigos G de eventos". Otros se utilizan para funciones que debe realizar el control y son llamados "Códigos G preparatorios".

Los códigos G de eventos más comunes para ejemplificar son el G00 para definir un movimiento lineal rápido sin corte, el G01 para definir un movimiento lineal con corte a un determinado avance, el G02 para definir un arco a favor de las manecillas del reloj, etc. También hay códigos G para ciclos de taladrado, fresado, desbaste, etc. los cuales se pueden definir en una sola línea de programa en vez de requerir varias líneas de movimientos individuales.

Los códigos G preparatorios le permiten al control interpretar ciertas acciones programadas. Por ejemplo el código G90 indica al control que todas las posiciones se toman como absolutas a partir de un punto de referencia fija. El G91 indica que las posiciones se toman en forma incremental a partir del último punto programado [B].

1.2.5.2 Códigos M.

Los códigos M son usados para ejecutar funciones misceláneas del control CNC. Estos códigos son definidos por el integrador del control a la máquina, es decir, que aunque el fabricante del control no los define, al momento del ensamble del mismo en la máquina, cada firma establece sus propios códigos. Actualmente, en el formato EIA, no existen códigos M estándar, pero existen algunos que se utilizan comúnmente como son el M02/M30 para fin de programa, M03 para encender el husillo en sentido de giro del reloj, M06 para definir un cambio de herramienta, M08 para encender lubricación, etc. Estas acciones no dependen de una posición, por lo tanto, son auxiliares [B].

1.2.6 Control numérico directo (DNC).

El Control Numérico Directo DNC (Direct Numerical Control) elimina la necesidad de utilizar discos, cartuchos o cualquier otro elemento para almacenamiento de información. El programa es ingresado directamente desde una terminal o computadora

hasta una máquina CNC o un conjunto de ellas. La señal de la computadora puede hacer correr directamente la máquina o que la información se almacene en su memoria. Este sistema fue muy utilizado para enviar los programas a los controles que no tenían memoria, la información enviada desde la computadora era procesada por la máquina en tiempo real. De esta forma se podían conectar varias máquinas a la misma computadora, aunque con la desventaja de que si la computadora central fallaba o si se tenía que detener alguna máquina a la mitad de algún programa, se tenía que apagar todas las máquinas para reiniciar el proceso. Actualmente se utiliza para enviar la información a la memoria del control para su posterior ejecución, o para enviar información en tiempo real cuando el programa es extremadamente largo para almacenarlo en la memoria del control o estableciendo una red de terminales independientes.

1.3 PROCESO TRADICIONAL DE SELECCIÓN DE MAQUINAS-HERRAMIENTA CNC.

El proceso de selección de una máquina-herramienta no es una labor sencilla, ya que se deben considerar diversos factores para que la inversión sea lo más redituable posible. Este proceso se complica aún más cuando los requerimientos del proceso de corte llevan a la necesidad de adquirir maquinaria CNC y herramientas de corte adecuada para este tipo de maquinaria. Haciendo a un lado las consideraciones de tipo económicas y comerciales, todavía algunas de las especificaciones técnicas y características de diseño no son hoy en día muy familiares para los ingenieros de producción y manufactura, por lo que deben recurrir a la asesoría del distribuidor de maquinaria para apoyar su decisión, o como en muchos casos sucede, delegar completamente la selección de la máquina adecuada para su proceso de corte.

El proceso de selección que comúnmente se efectúa se divide en dos ramas que no se retroalimentan entre sí. Por un lado se realiza la selección del herramental así como los parámetros de corte adecuados, según las recomendaciones del fabricante apoyándose de tablas, manuales, etc. Y por otro lado se determina la máquina adecuada según el tipo de proceso, dimensiones y peso de las piezas de trabajo, si el tipo de control es el adecuado, necesidad de equipo periférico, etc. Asimismo se recurre a la experiencia del asesor para determinar que potencia es necesaria según la aplicación efectuada, aunque existen tablas de consulta y formulas aproximadas, estas llegan a ser tan poco confiables que en la mayoría de los casos los asesores confían más en su experiencia y la de su grupo de trabajo (diagrama 1).

Para la empresa consultora y distribuidora de maquinaria, la aplicación de este proceso para la selección y recomendación de maquinaria ha demostrado ser muy poco confiable. Según datos de la empresa, aproximadamente el 20 % de las máquinas vendidas no han satisfecho completamente la necesidad de los clientes ya que no pueden efectuar el trabajo para el cual adquirieron una máquina CNC, ya sea por falta de potencia de la máquina, un control con capacidad limitada, etc. Esto genera enormes gastos por viajes del personal técnico para asistir al cliente, realización de pruebas de corte en planta, etc., y en casos extremos por la devolución de maquinaria directamente al fabricante.

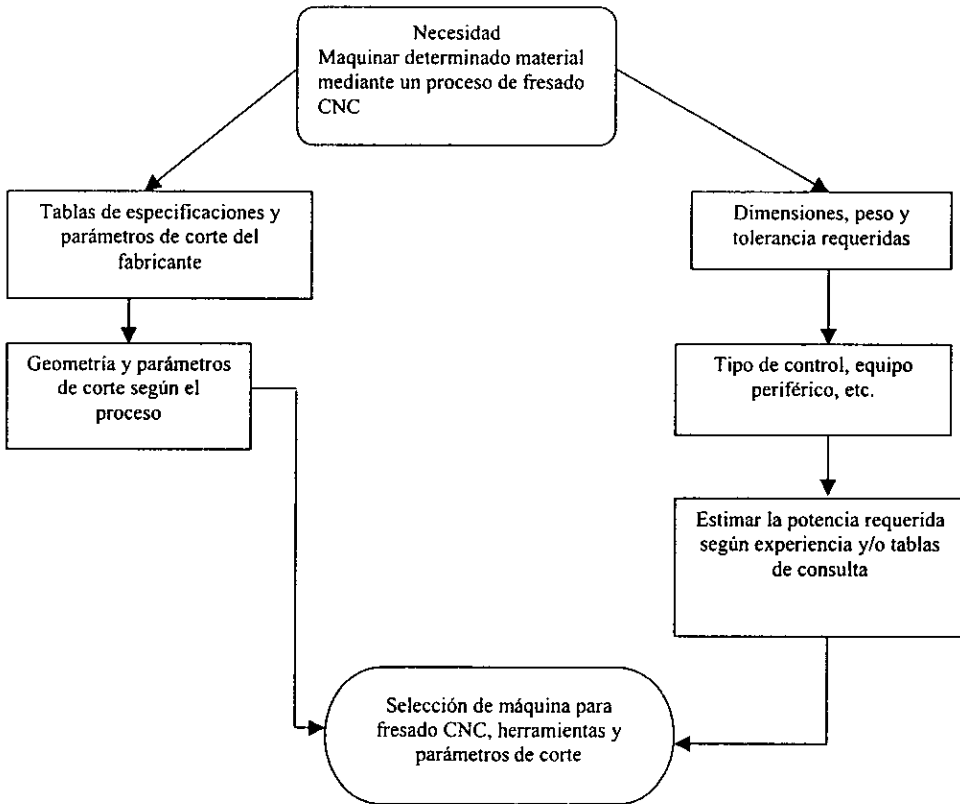


Diagrama 1. Selección tradicional de Máquinas-herramienta CNC para proceso de Fresado.

De acuerdo a los problemas que se presentan al efectuar la selección de una máquina-herramienta por un método tradicional, se ve claro la necesidad de proponer un método más confiable para efectuar la selección, ya que como se presenta en el diagrama 1, características como el torque de la máquina, se recomiendan sólo de acuerdo a la experiencia. Este método debe considerar también el tipo de proceso, dimensiones y peso de las piezas de trabajo, si el tipo de control es el adecuado, necesidad de equipo periférico, etc., así como las herramientas de corte adecuadas.

1.4 CLASIFICACION DE LAS MAQUINAS-HERRAMIENTA CNC.

Existen diversos tipos de máquinas-herramienta, por lo que para efectuar una selección adecuada, primero se debe determinar el tipo de máquina que sea capaz de realizar el proceso requerido, por ello, se presentan algunos de los tipos de máquinas-herramienta CNC más comunes comercialmente.

No es posible efectuar una clasificación que contemple todas las características de las máquinas de control numérico, sin embargo, de una forma general pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo de operación que son capaces de realizar de la forma que sigue:

a. Fresadoras.

1. *Fresadora de mesa fija.*
2. *Fresadora puente.*
3. *Fresadora grabadora.*

b. Centros de maquinado.

1. *Centro de maquinado vertical.*
2. *Centro de maquinado horizontal.*
3. *Centro de maquinado horizontal y vertical.*

c. Tornos.

1. *Torno Horizontal (universal).*
2. *Torno Vertical.*

d. Cortadoras láser.

e. Rectificadoras.

1. *Rectificadora cilíndrica de exteriores.*
2. *Rectificadora de superficies planas.*
3. *Rectificadora de cigüeñales.*
4. *Rectificadora de roscas.*
5. *Rectificadora de engranes.*

f. Electroerosionadoras.

1. *Electroerosionadoras de hilo.*
2. *Electroerosionadoras por penetración.*

g. Cortadoras por chorro de agua.

h. Punzonadoras.

1.4.1 Fresadoras.

En las máquinas fresadoras fue donde se incorporó por primera vez el control numérico para la fabricación de piezas. Este tipo de máquinas tienen la capacidad de movimiento sobre la mesa y multiangular en el husillo, asimismo es posible incorporar movimientos de la pieza de trabajo a través de otros ejes.

Actualmente, los tipos de máquinas fresadoras que más comúnmente son comercializadas son las siguientes:

1. **Fresadora de mesa fija.** Esta máquina tiene la característica de contar con una mesa fija, mientras que la columna y el cabezal se desplazan en forma horizontal y vertical correspondientemente.
2. **Fresadora puente.** La columna de esta fresadora es un puente donde se desliza el cabezal; esta máquina es óptima cuando las piezas a maquinar son de grandes dimensiones y peso (Fig 1.5).
3. **Fresadora grabadora.** Esta máquina tiene una forma de operación similar a un pantógrafo, es decir, tiene un elemento de palpado que seguirá la forma de la superficie que se desea copiar, de esta forma el cortador desbastará el material hasta obtener lo deseado.

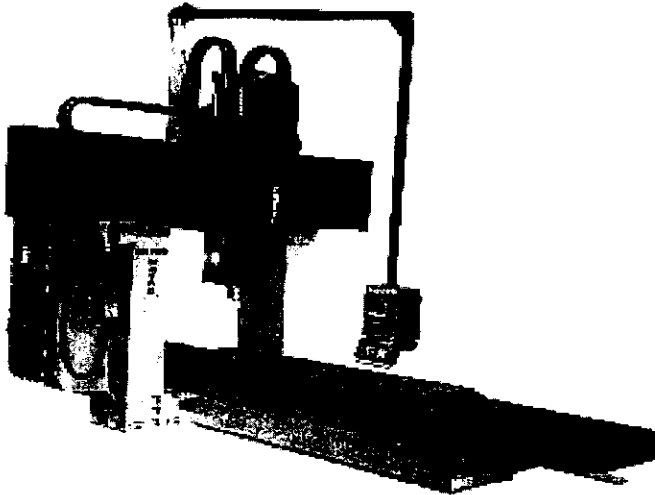


Figura 1.5 Fresadora puente Zayer KP.

1.4.2 Centros de maquinado.

Los centros de maquinado son el último desarrollo de la tecnología CNC. Estos sistemas vienen equipados con cambiador automático de herramientas y capacidad para cambio de 90 o más. Hay centros de maquinado que son ajustados para trabajar con mesas de trabajo rectangulares llamadas pallets. Estos pallets son utilizados en forma automática para facilitar la carga y descarga de las piezas de trabajo. En una preparación, los centro de maquinado pueden realizar operaciones de fresado, taladrado, machueleado y más.

Adicionalmente, la utilización de sistemas de fijación de piezas de trabajo que permite su rotación con determinado ángulo a cada señal que envía el control para el maquinado de diferentes planos o caras de la pieza (indexadores) hace posible la ejecución de diferentes tareas a determinados ángulos. Los centros de maquinado ahorran tiempo de producción y costos reduciendo la necesidad de mover las piezas de una máquina a otra.

1. **Centro de maquinado vertical.** Toma este nombre debido a que el husillo de la máquina sólo realiza su trabajo verticalmente, es decir, la superficie de trabajo sólo será la parte superior de la pieza (Fig 1.6).
2. **Centro de maquinado horizontal.** Al igual que centro de maquinado vertical, esta máquina realiza su trabajo sólo por un costado de la pieza. Es posible el maquinado en otra superficie cuando existe algún elemento que de movimiento a la pieza trabajo.
3. **Centro de maquinado horizontal y vertical.** Esta máquina tiene la característica de contar con un husillo multigrados, esto es, tiene la posibilidad de maquinar en cualquier posición que se desee, es decir, realizar trabajos de desbaste superior como por alguno de sus costados, mejor aún, el husillo puede posicionarse en cualquier ángulo de acuerdo a las características de la pieza de trabajo.

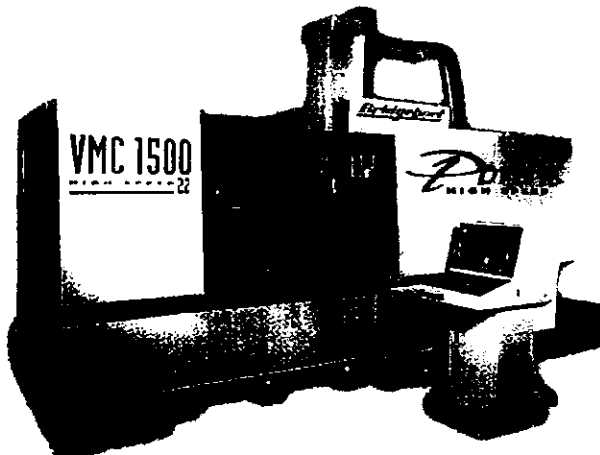


Figura 1.6 Centro de maquinado vertical tipo portal VMC 1500 de Bridgeport.

1.4.3 Tornos.

Los centros de torneado (tornos CNC) incrementan su capacidad de producción porque cuentan con cambio de herramientas automático, estas máquinas CNC son capaces de ejecutar diferentes operaciones de corte simultáneamente sobre una pieza rotatoria.

Los avances tecnológicos han hecho que se incremente su flexibilidad, ya que se puede contar con alimentadores de barra y extractores de piezas completamente automatizados, por tanto, se evita la necesidad de preparación y transportación para cada pieza.

1. **Torno horizontal (universal).** Este torno es similar en su operación a cualquier torno paralelo, es decir, la herramientas de corte se desplazarán horizontalmente sobre la pieza a tornear. Al incorporar el cambio de herramientas automático y la posibilidad de rotación de los cortadores, da como consecuencia un menor uso de máquinas adicionales (Fig. 1.7).
2. **Torno vertical.** Para esta clase de máquina, las piezas a tornear (por su gran peso) son colocadas verticalmente, por tanto, la potencia del motor es mucho mayor a los tornos horizontales, de tal forma que las herramientas de corte realizarán su trabajo en forma ascendente y descendente.

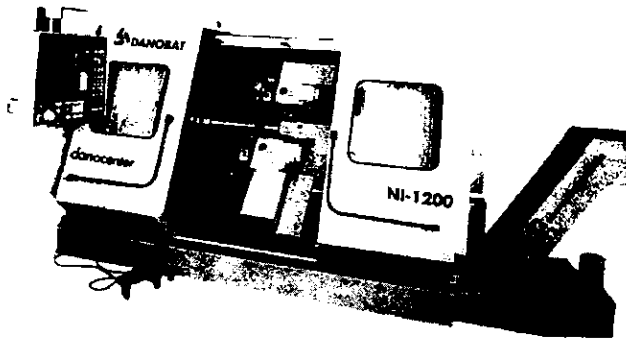


Figura 1.7 Torno de doble torreta Danocenter NI – 1200 de Danobat.

1.4.4 Cortadoras láser.

El proceso de corte con láser se basa en la generación de un haz por medio de diferentes gases presurizados como son, Helio (He), Bióxido de carbono (CO₂), Nitrógeno (N₂) que se mezclan en una cámara para posteriormente transportarlos a un resonador, saliendo como un intenso haz y conducido a diferentes lentes para concentrarlo. La potencia puede variar dependiendo modelo de las máquinas y la aplicación.

El material bajo el intenso haz láser (140 W) sufre un súbito incremento de temperatura y es vaporizado. Si el haz es lo suficientemente potente, este penetrará a través del material (Fig. 1.8).

En los cortes por láser no intervienen fuerzas físicas, por lo tanto las piezas sufren un mínimo de distorsión.

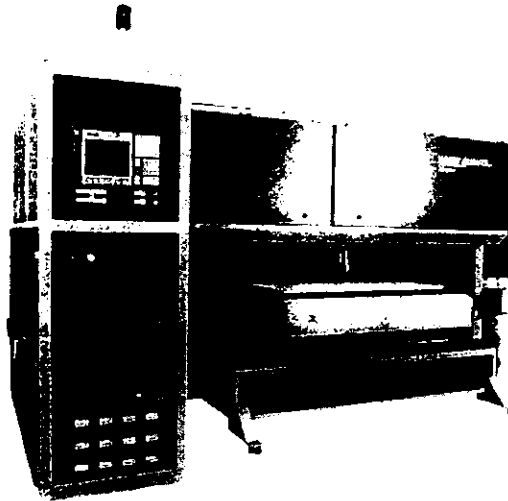


Figura 1.8 Cortadora láser Quanta LQ – 700.

1.4.5 Rectificadoras.

Una rectificadora es una maquina que efectúa el arranque de material empleando como herramienta un material abrasivo (normalmente en forma de disco). Se utiliza principalmente para proporcionar acabado y tolerancias más cerradas en una pieza, ya que la profundidad de corte en cada paso normalmente es solo algunas milésimas de pulgada. Las máquinas rectificadoras CNC incrementan la producción por su capacidad para lograr perfiles tanto en la pieza como en el disco abrasivo. Tienen la posibilidad de utilizar tres ejes simultáneamente (indexador) para la generación de perfiles complejos.

- 1. Rectificadora cilíndrica de exteriores.** Como su nombre lo indica, esta máquina desempeña su trabajo sobre superficies cilíndricas, su operación es similar a las máquinas convencionales, sólo que el control disminuye la operación de vigilancia del trabajo.
- 2. Rectificadora de superficies planas.** Al igual que la de superficies cilíndricas, esta máquina realiza diferentes perfiles sobre la pieza, ya sea con piedras abrasivas de forma o convencionales (Fig. 1.9).

3. **Rectificadora de cigüeñales.** Es una de las máquinas de mayor importancia dentro de la industria automotriz, tiene la característica de interpolación simultánea con el movimiento del cigüeñal y la piedra. Se incorpora la más alta tecnología por la exigencia en este ramo.
4. **Rectificadora de roscas.** La gran precisión con que se debe realizar este trabajo depende en gran medida del disco abrasivo y del control de la máquina. Se conjuga el movimiento simultáneo de un eje que mueve los elementos con roscas, el paso en el disco, la velocidad de éste y perfil de la rosca que se está rectificando. El poder del control determinará el desgaste de la piedra y el número de rectificaciones de la misma.
5. **Rectificadora de engranes.** En la rectificación de engranes se conjuga el uso de una rectificadora de superficies y el uso de un indexador, este último girará el número de grados necesarios para el paso de la piedra de forma en cada diente.

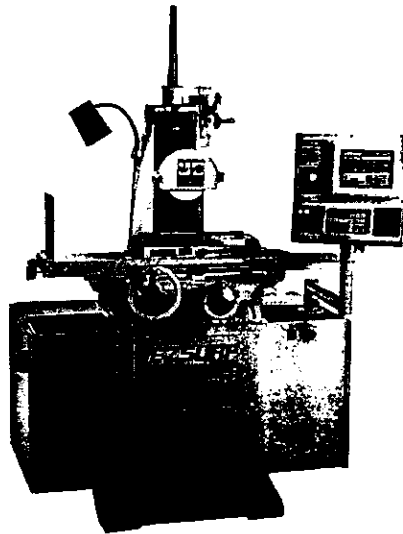


Figura 1.9 Rectificadora de superficies EZSurf de Bridgeport.

1.4.6 Electroerosionadoras.

El electroerosionado es un proceso de arranque de material mediante descargas eléctricas que erosionan el material de trabajo. Se utiliza como herramienta de corte simplemente un hilo que se desplaza a través del material o un electrodo que puede tener cierta forma especial que al ir penetrando en pasos sucesivos, se obtiene una contraparte en la superficie del material. Para realizar el proceso, se sumerge la pieza de trabajo y la herramienta en un electrolito.

1. Las máquinas erosionadoras de hilo (EDM) utilizan alambre delgado de latón (0.0008 a 0.012 pulg) como electrodo. El alambre pasa entre dos rodillos y corta la pieza como una

sierra-cinta. El material es removido debido a la erosión causada por las descargas eléctricas y el movimiento horizontal de la mesa (controlada por CNC).

Esta clase de máquinas son utilizadas para la fabricación de insertos para moldes, dados de extrusión, así como herramientas de forma.

2. Las máquinas erosionadoras por penetración tienen la capacidad de usar diferentes electrodos de cobre, estos servirán para determinar la superficie de la pieza a trabajar. Es posible la utilización de electrodos de forma para evitar su cambio y aumentar la producción (Fig. 1.10).

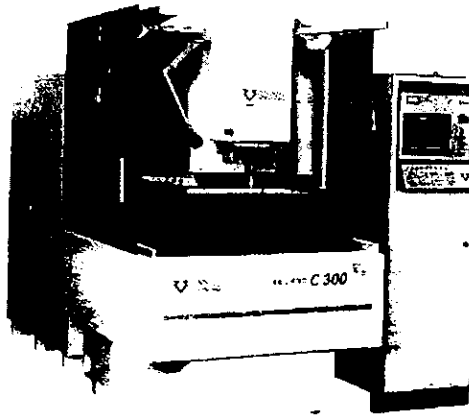


Figura 1.10 Electroerosionadora TECHNO C 300.

1.4.7 Cortadoras por chorro de agua.

Las máquinas de corte por chorro de agua tienen un tanque de almacenamiento de agua a alta presión, la cual al momento de salir por una boquilla adquiere una elevada energía cinética, de tal forma que el material de trabajo es erosionado al momento de que es golpeado por el chorro de fluido. La forma de la pieza dependerá del movimiento de la mesa de trabajo que es controlado por CNC (Fig. 1.11).

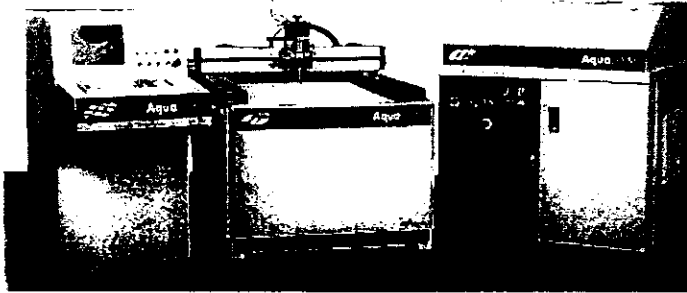


Figura 1.11 Cortadora por chorro de agua GADIA.

1.4.8 Punzonadoras.

El punzonado es un proceso de corte de material (generalmente lamina). Se emplea un punzón de forma (dado) que puede desplazarse sobre la lamina golpeando en las posiciones que se han programado.

Las máquinas punzonadoras CNC tienen la característica de controlar la posición donde se realizará el punzonado con el movimiento de la lámina, de igual forma la figura que se desea obtener sin que sea necesario la utilización de una herramienta específica, asimismo almacenar diferentes punzones y a su tiempo la selección de alguno en específico (Fig. 1.12).

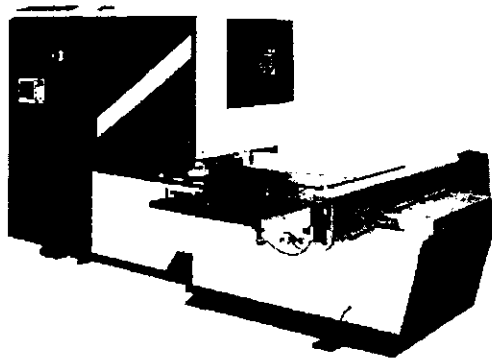


Figura 1.12 Punzonadora GOITI GPS - 1000.

1.5 LA MAQUINA CNC, SU CONFIGURACION.

Para asegurar una selección óptima, la configuración de una máquina de CNC debe cumplir con diversas características especiales comparándose con una máquina de operación convencional. Aunque a simple vista no se aprecian esas diferencias, ha sido necesario desarrollar una tecnología de materiales y diseño mecánico aplicada al perfeccionamiento de este tipo de maquinaria. Es usual que máquinas similares en cuanto capacidad, volumen de trabajo y marca tengan una diferencia de precio del 100% por el hecho de estar controlada numéricamente. Las partes principales de una máquina-herramienta CNC son:

- Motor principal.
- Transmisión de potencia al husillo principal.
- Husillo portaherramienta.
- Estructura o "casting".
- Guías, bancada, mesa.
- Intercambiadores de herramientas.
- Motores para movimiento en ejes.
- Equipo periférico.

La descripción de estos elementos se da a continuación.

1.5.1 El motor principal.

Al ser este elemento el que proporcionara a la herramienta la capacidad de arranque de viruta, se han buscado incrementar características esenciales como la velocidad y la potencia. Al obtener altas velocidades (comúnmente entre 6000 a 15000 rpm para máquinas de la industria metal-mecánica), es posible proporcionar excelentes acabados superficiales trabajando a elevados avances con trayectorias complicadas. Es obvio que una mayor potencia permitirá maquinar materiales de alta dureza como aleaciones ferrosas, aceros inoxidable y hasta materiales tratados o titanio. En centros de maquinado o torneado, es común utilizar motores de entre 15 a 30 HP.

1.5.2 La transmisión de potencia al husillo principal.

Dependiendo del tipo de transmisión empleado en el husillo principal se obtendrán diferentes valores del torque nominal de la máquina y esto juega un papel importante en la vibración o suavidad con la que gire el husillo. Comúnmente se utilizan bandas dentadas o con líneas helicoidales de alta resistencia y flexibilidad cuando se cuenta con una transmisión directa del motor al husillo; este sistema se utiliza cuando el caballaje es lo suficientemente elevado para operaciones de corte rudo y funciona como un fusible mecánico, además de proporcionar un giro silencioso y con muy poca vibración.

También es posible encontrar transmisión con cajas de engranes con uno o más rangos de velocidad. Como cualquier sistema de engranes, aprovecha la relación torque-

velocidad obteniendo a la salida mayor magnitud de uno u otro según sea necesario (Fig. 1.13). Se utiliza generalmente para proporcionar al husillo principal mayor torque al corte cuando se dispone de un motor de caballaje limitado. Este es un elemento que encarece el costo de la máquina, ya que se requiere de un sistema de engranaje con un diseño tal, que proporcione muy baja vibración a altas velocidades, además de soportar la reacción por el enorme esfuerzo a que se somete la herramienta durante el corte.

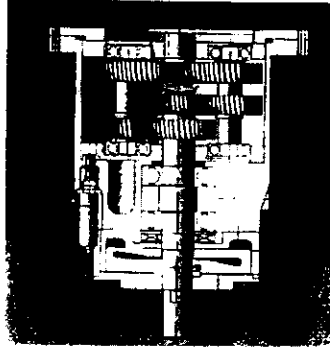


Figura 1.13 Sistema de transmisión para centro de maquinado TORQ-CUT de Bridgeport.

1.5.3 Husillo portaherramienta.

El husillo portaherramienta es un elemento de gran importancia en el diseño de la máquina, por lo que debe de someterse a rigurosas pruebas. Una prueba común es colocar el husillo a elevadas temperaturas girando a velocidades de entre 5000 a 15000 rpm durante un lapso de tiempo prolongado (mas de 24 horas) para verificar su estabilidad térmica, el comportamiento de baleros y eje y si existe algún tipo de flexión. El cono del husillo puede diseñarse bajo distintas normas, como son conos con norma BT, CAT, NT, ISO, DIN, R8, etc. Los cuales difieren en forma y tipo de sujeción.

Existen máquinas, principalmente como tornos o centros de maquinado, llamados multihusillos, los cuales pueden maquinar una misma parte simultáneamente en posiciones y operaciones distintas utilizando dos o más husillos portaherramientas.

1.5.4 Estructura o “casting”.

El diseño de la estructura de la máquina es tal vez el punto de comparación más utilizado entre una máquina con otra. La estructura en base, columna y mesa debe de ser lo más robusta y con el mejor diseño posible. No sólo el peso de la estructura es importante, si bien es cierto que una máquina con estructura pesada disminuye la vibración provocada por la inercia de los elementos móviles y por la reacción a la fuerza de corte implicada en un proceso determinado, también se ha dado importancia al diseño geométrico de la estructura. En algunas máquinas se utilizan nervaduras, que ayudan a absorber la vibración y ayudan a la disipación de calor, disminuyendo los efectos de dilatación por calentamiento. También se cuida la ubicación del centro de gravedad en la máquina, para evitar que un movimiento

brusco de la mesa o husillo, provoque un momento de inercia que vuelque la máquina. Muchos fabricantes importantes normalmente fabrican la columna principal (en un centro de maquinado) o la base de bancada (en un torno) de una sola pieza de fundición de un hierro gris especial denominado "meehanite" que cuenta con las propiedades necesarias para soportar grandes cargas durante el trabajo manteniendo su estabilidad dimensional. Existen también máquinas cuya estructura consiste en placas unidas por soldadura, aunque esto implica una calidad menor a una estructura de fundición.

1.5.5 Guías, bancada, mesa.

Estos son elementos que normalmente se someten a fricción muy severa, debido a que tienen la función de trasladar la pieza de trabajo o el husillo portaherramienta según la posición programada. La mayoría de las guías y bancadas son manufacturadas con materiales de alta dureza que posteriormente son templados y rectificados. En algunos casos se verifica la alineación de una guía o bancada con un comparador láser para detectar cualquier variación en la alineación de los elementos. Para trasladar una mesa, se pueden utilizar guías de diseño plano, prismático, en V, etc. además de ser recubiertas con algún antifricciónante como el Turcite-B, un material compuesto con bajo coeficiente de fricción, que permite deslizar una mesa suavemente, aún cuando se haya colocado una pieza de peso considerable. También las guías pueden consistir en guías "lineales", es decir, ensambles de baleros recirculantes, templados y rectificados, los cuales se diseñan geométricamente para posicionar su centro de gravedad en el punto de contacto para soportar el peso (Fig. 1.14). El porque de todo este complicado diseño se comprende cuando es normal que un centro de maquinado de mediano tamaño tenga movimientos de sus ejes de 30 a 40 m/min. y soporte sobre su mesa 2000 ó 3000 Kg en operación continua.

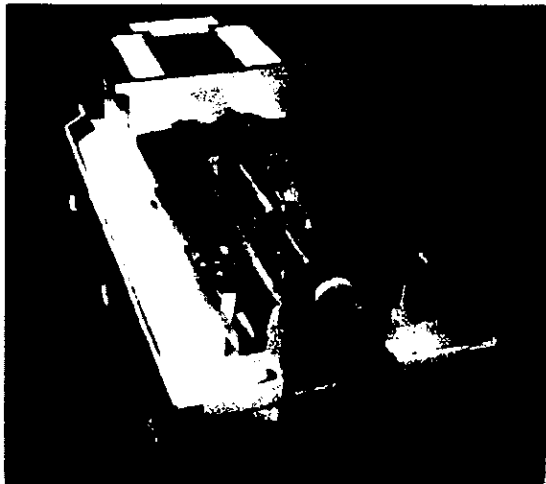


Figura 1.14 Guías lineales para centro de maquinado.

1.5.6 Intercambiadores de herramientas.

El sistema de intercambiador de herramientas sujeta y ordena los portaherramientas, que a su vez contienen diferentes herramientas. Puede tener un sistema muy variable de una máquina a otra, algunos se asemejan a un carrusel, ya sea horizontal o vertical, otros colocan los portaherramientas en línea, otros en forma radial, etc. Sea cual sea el mecanismo, se requiere que el cambio de herramienta se ejecute lo más rápido posible, ya que en un proceso de corte sencillo, se requiere de la utilización de 4 a 10 herramientas. El intercambiador puede ser además bidireccional, es decir, que determine cual es la trayectoria más corta de la herramienta a utilizar. En un centro de maquinado es común tener intercambiadores de 20 a 50 ó más portaherramientas con velocidades de cambios de herramienta de 2 a 3 seg. en portaherramientas adyacentes (Fig. 1.15). En un centro de torneado se pueden tener de 10 a 20 portaherramientas con velocidad de cambio de herramienta de menos de 1 seg.



Figura 1.15 Cambiador de 22 herramientas tipo carrusel para centro de maquinado.

1.5.7 Motores para movimiento en ejes.

En la mayoría de las máquinas actuales, se utilizan servomotores de AC ó DC para movilizar ya sea la mesa de trabajo, el husillo principal, etc. a lo largo de los ejes de la máquina. Este tipo de motores varían su velocidad y movimiento angular, según la magnitud de corriente que reciba de su controlador (Fig. 1.16). De esta forma se logra trasladar el husillo portaherramienta o la mesa, a diferentes velocidades con una gran precisión de posicionamiento y repetibilidad (de ± 0.005 mm. hasta ± 0.0015 mm). El elemento que proporciona el movimiento lineal de los ejes para trasladar una mesa o husillo portaherramienta consiste en un ensamble de tornillo de bolas recirculante con lubricación continua automática. El tornillo es acoplado al servomotor y soportado por baleros de alta precisión prelubricados. Al girar el tornillo, desplaza la tuerca que contiene balines con diámetros mayores a 30mm. Esta tuerca se sujeta a la consola, cabezal y mesa para proporcionar un movimiento lineal.

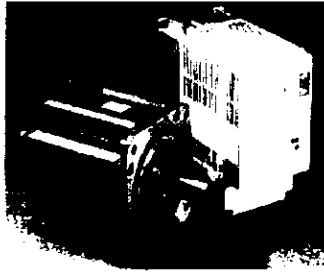


Figura 1.16 Servomotores de corriente alterna.

1.5.8 Equipo periférico.

Existe gran cantidad de equipo periférico que se puede instalar para automatizar aún más un proceso de manufactura. Algunos de los equipos más comunes son los siguientes.

1.5.8.1 Mesas rotatorias.

Funcionan como cuarto eje rotatorio en Centros de Maquinado de mediano tamaño (Fig. 1.17). Se instalan sobre la mesa de trabajo, sujetando la pieza de trabajo por medio de un mandril y pueden girar en un eje paralelo al eje X ó Y. Se considera un cuarto eje, debido a que el control reconoce su existencia y puede hacer interpolaciones simultáneas con dos o más ejes.



Figura 1.17 Mesa rotatoria Fadal.

1.5.8.2 Indexador.

Tiene un funcionamiento similar al de un cabezal divisor; la diferencia estriba en que su accionamiento no es manual, sino que se realiza por medio de señales que envía el control a un motor eléctrico, que a su vez hace rotar el dispositivo de sujeción del indexador un determinado número de grados. Al no tener un ciclo de retroalimentación o ciclo cerrado con el control, no se considera como un eje de movimiento.

1.5.8.3 Extractores de viruta.

Se utilizan tanto en centros de maquinado, como en centros de torneado. Consiste en una banda generalmente metálica que se desplaza bajo el área de trabajo (mesa o bancada) transportando la viruta fuera de la máquina a un depósito exterior. Esto con el propósito de no detener la producción de la máquina constantemente para sacar la viruta de la charola recolectora. Otro tipo de recolectores compactan la viruta, eliminando a la vez el exceso de refrigerante utilizado durante el corte y la extraen en forma de un bloque para un manejo más sencillo.

1.5.8.4 Alimentadores de material.

Los alimentadores de material pueden tener un diseño muy variable dependiendo del tipo de máquina y su aplicación. Para tornos se utilizan alimentadores de barra automáticos, los cuales se activan una vez que se ha concluido una operación de maquinado. En un centro de maquinado se pueden adaptar actuadores o mecanismos transportadores, llamados pallets, los cuales son conjuntos de mesas que se colocan en el área de trabajo una tras otra, después de terminada la operación de corte de la pieza, mientras un operador descarga la pieza terminada de la mesa que acaba de salir del maquinado. También se emplean manipuladores o robots para la carga y descarga de material cuando se emplea la máquina CNC bajo un concepto de Célula de Manufactura.

Existen además muchos otros equipos para eficientar la producción CNC como son los compensadores automáticos de diámetro y longitud de herramientas, probadores para determinación de centros y distancias de referencia, extractores de polvo para rectificadoras, equipos de lubricación por niebla, etc.

1.6 EL CONTROL CNC.

El tipo y capacidad del control CNC con que cuenta la máquina es un factor sumamente importante a considerar durante la selección. Los controles actuales de CNC, aunque varían enormemente en posibilidades, capacidad de almacenamiento, facilidad de operación, etc. conservan la misma base conceptual, en cuanto al tipo de movimiento de la herramienta y la determinación de posiciones, por lo que físicamente (panel de control) son un tanto similares.

Las marcas de controles más comerciales son:

- Fanuc.
- Mazatrol de Mazak.
- Heidenhain.
- Hitachi.
- Bridgeport.
- Okuma.
- Sinumerik de Siemens.

- Mitsubishi.
- Selca.
- Fagor.
- Haas.
- Dynapath.
- Emcotronic de Emco.

1.6.1 Movimientos y ciclos de control.

Por el tipo de movimiento, los controles se pueden clasificar en dos tipos, por movimientos punto a punto y con movimiento de trayectoria continua de la herramienta.

Por otro lado, los ciclos de control se clasifican en sistemas de ciclo cerrado y sistemas de ciclo abierto.

1.6.1.1 Movimientos punto a punto.

El modo de movimiento punto a punto posiciona la herramienta en un lugar determinado sobre la pieza de trabajo para ejecutar allí una operación para posteriormente dirigirse a otro lugar [B]. Se dice que es punto a punto debido a que sólo es posible programar una secuencia de posiciones, mas no así alguna trayectoria en particular, como una circular, helicoidal, etc. Algunas operaciones comunes controladas punto a punto son el taladrado, machueleado, perforado, rimado, y marcado por golpe (Fig. 1.18).

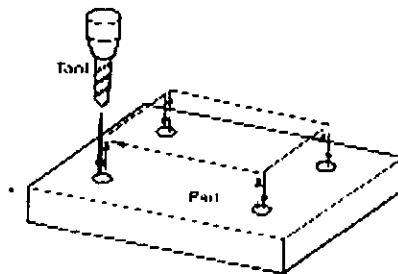


Figura 1.18 Movimientos punto a punto.

1.6.1.2 Movimiento de Trayectoria continua de la herramienta.

Los controladores de trayectoria continua son llamados así porque permiten que la herramienta mantenga un contacto continuo con la pieza de trabajo durante el corte (Fig.1.19). Operaciones de trayectoria continua incluyen fresado de líneas a cualquier ángulo, fresado de arcos, torneado, etc.

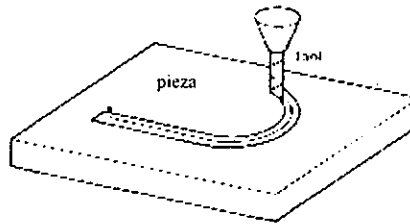


Figura 1.19 Movimientos de trayectoria continua.

Se utilizan diferentes sistemas de ciclos para controlar los movimientos de la herramienta. Un sistema cíclico envía señales eléctricas para accionar los controladores del motor y recibe alguna forma de información de retroalimentación eléctrica desde el controlador del motor. Uno de los principales factores que influyen en la tolerancia obtenida en la pieza maquinada es el tipo del sistema de ciclo de control. Este puede ser un sistema de control de ciclo abierto o uno de ciclo cerrado, que se explican a continuación.

1.6.1.3 Sistemas de ciclo abierto.

Un sistema de ciclo abierto utiliza motores de pasos para generar movimientos. El rotor de estos motores gira un determinado valor, usualmente 1.8° , por cada pulso recibido. Los motores de pasos son alimentados por señales eléctricas provenientes del MCU. Los motores son conectados a los tornillos de bolas recirculantes de la mesa y husillo de portaherramientas. Al recibir la señal los motores mueven los ejes de la máquina cierta distancia proporcional. El controlador del motor envía señales de regreso indicando que el motor ha completado el movimiento. La retroalimentación se utiliza para verificar que tan cerca se encuentra en realidad la máquina de la posición exacta que se ha programado (Fig. 1.20).

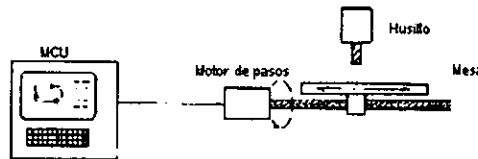


Figura 1.20 Sistema de ciclo abierto.

1.6.1.4 Sistemas de ciclo cerrado.

Motores especiales llamados servomotores son utilizados para ejecutar los movimientos de la máquina en los sistemas de ciclo cerrado. Este tipo de motores pueden ser servos AC, servos DC y servos hidráulicos, al ser los servos hidráulicos los más

potentes, se utilizan en las máquinas CNC de mayor tamaño. Los servos AC les siguen en fuerza y son los más comunes en centros de maquinado.

Un servo motor no opera como uno de pasos por pulsos. La velocidad en los servos AC y DC es variable dependiendo del flujo de corriente que pase a través de él. Por tanto, el MCU enviará el amperaje necesario para producir la velocidad programada.

Se utilizan los servos para desplazar el husillo portaherramienta y la mesa de trabajo; esto mediante tornillos de bolas recirculantes. Un dispositivo llamado codificador (encoder), continuamente el valor de la velocidad y la posición en que el husillo y/o la mesa se desplaza y envía esta información de regreso al MCU. El MCU puede entonces ajustar la señal según la posición real del husillo y/o la mesa para aproximarse más a la posición programada. Los sistemas que proporcionan este tipo de señales de retroalimentación se denominan servo sistemas o servo mecanismos (Fig. 1.21). Estos pueden posicionar la herramienta con un alto grado de precisión aún cuando se alimentan motores de alta potencia.

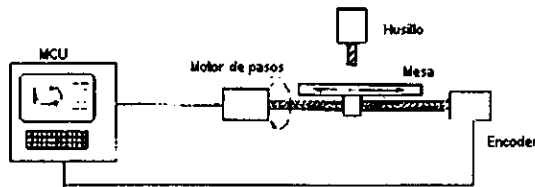


Figura 1.21 Sistema de ciclo cerrado

1.6.2 Establecimiento de posición por coordenadas cartesianas.

La posición de una máquina CNC en cualquier momento es controlada por un sistema de coordenadas XYZ, llamado sistema Cartesiano. Este sistema se compone de tres líneas direccionales llamadas ejes, que mutuamente se intersectan a 90°. El punto de intersección se conoce como origen. El plano coordenado XY se divide en cuatro cuadrantes [B]. En el primer cuadrante el signo de las coordenadas tanto en X como en Y serán positivas. En el segundo se tendrá a Y positivo y X negativo, en el tercero tanto X como Y son negativos, y en el cuarto se tiene a X positivo y Y negativo (fig. 1.22).

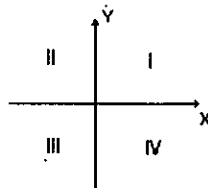


Figura 1.22 Representación de los cuatro cuadrantes del sistema de coordenadas

1.6.3 Ejes de movimiento en máquinas CNC.

Los equipos CNC ejecutan operaciones de movimiento, ya sea en forma lineal deslizante o por movimientos rotacionales. El método real de movimiento es diseñado por el constructor y puede variar de máquina a máquina. Por ejemplo en un centro de maquinado vertical, la mesa se puede mover en un plano horizontal (movimientos en los ejes X ó Y) y el husillo portaherramienta moverse en forma vertical (movimiento en el eje Z). De esta forma, el sistema respondería a una orden de mover el husillo (herramienta) a lo largo del eje X o Y moviendo la mesa en la dirección opuesta, -X o -Y. Debido a que la máquina determina automáticamente como moverse en respuesta a un comando, al operador no le importara saber si es la mesa o el husillo el que se mueve, lo importante es que la herramienta llegue al punto final programado o que siga una trayectoria determinada sobre la pieza. Para propósitos de programación, se considera generalmente que la mesa se encuentra fija y que el husillo con la herramienta se mueve a lo largo de los ejes X, Y, Z.

Actualmente se han estandarizado la dirección de los ejes de la máquina de acuerdo a la norma de la EIA (Electronic Industries Association), según el reporte EIA RS-267 [B]. Estos estándares incluyen:

- Los movimientos de los ejes primarios de la herramienta deben seguir la regla de la mano derecha (Fig. 1.23).
- El movimiento del husillo principal se define a lo largo del eje Z. Los movimientos en la dirección de trabajo es en dirección de -Z, y los movimientos alejándose de la zona de trabajo es en dirección de +Z.
- En las máquinas fresadoras, el movimiento a lo largo del eje X es la carrera mas larga perpendicular al eje Z. El movimiento indicado como -X es el opuesto al indicado como +X sobre la misma línea. El eje X es paralelo a la zona de trabajo en el plano horizontal. El eje X se mueve a la derecha a lo largo del plano de trabajo tal como el operador mira hacia la máquina.
- Continuando con las máquinas fresadoras, el movimiento a lo largo del eje Y es la carrera mas corta perpendicular al eje Z. El movimiento indicado como -Y es el opuesto al indicado como +X sobre la misma línea. El eje Y es en el mismo plano que el eje X. Mirando al plano, el operador notara que el eje Y es perpendicular al eje X.

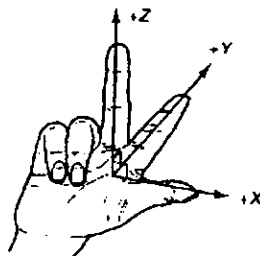


Figura 1.23 Regla para el sistema de la mano derecha en el movimiento lineal.

La mayoría de las máquinas fresadoras CNC puede realizar movimientos simultáneos a lo largo de X, Y, Z; estas son llamadas máquinas de tres ejes.

Maquinaria CNC más compleja tiene la capacidad de ejecutar movimientos adicionales rotatorios como los siguientes (fig. 1.24):

- Rotación alrededor de un eje paralelo al eje X ó eje A rotatorio.
- Rotación alrededor de un eje paralelo al eje Y ó eje B rotatorio.
- Rotación alrededor de un eje paralelo al eje Z ó eje C rotatorio.

Por ejemplo, un centro de maquinado vertical equipado con una mesa rotatoria, será capaz de mover un cuarto eje o eje C rotatorio. Si además tiene la capacidad adicional de oscilar la mesa de trabajo sobre los ejes A ó B, un cuarto y quinto eje son adicionados. En tal caso, la maquina es capaz de mover cinco ejes simultáneamente, tres lineales y dos rotatorios (Fig. 1.24).

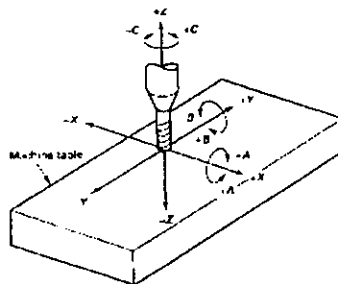


Figura 1.24 Movimientos de seis ejes para Centro de Maquinado Vertical.

Los movimientos rotatorios, de igual forma siguen la regla de la mano derecha (Fig. 1.25). Los centros de maquinado como el del ejemplo anterior, con cinco o seis ejes son utilizados para el maquinado de partes con superficies muy complicadas

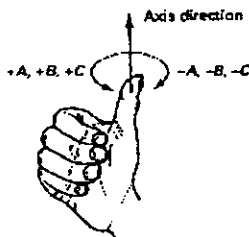


Figura 1.25 Regla de la mano derecha para movimientos angulares.

1.6.4 Modos de posicionamiento de la herramienta incremental y absoluto.

Una vez que se han establecido los ejes coordenados de la máquina, existen dos modos de posicionar la herramienta; estos son los modos absoluto o incremental.

1.6.4.1 Posicionamiento incremental.

Operando la máquina de esta manera, la localización cada nueva posición de la herramienta, se realiza tomando como punto de referencia la última posición real.

El posicionamiento incremental tiene varias desventajas. La más importante es que si un movimiento incremental es erróneo, todos los subsecuentes serán también incorrectos.

1.6.4.2 Posicionamiento absoluto.

Cuando se opera en este modo, la máquina determina cada nueva posición con relación a un punto fijo (0,0,0) predeterminado como origen.

La mayoría de los controles modernos tienen la capacidad de operar en ambos modos, incremental y absoluto. El programador puede cambiar de un modo a otro utilizando solamente un comando.

1.6.5 Almacenamiento y programación.

La programación en las máquinas con CNC puede realizarse de diferentes formas según el diseño del control y sus posibilidades. Algunos de los métodos más comunes son la programación a pie de máquina, programación externa y programación asistida.

1.6.5.1 Programación a pie de máquina.

De esta forma el programador ingresa los códigos e instrucciones directamente en el editor del control respetando su formato. Para ello, muchos controles cuentan con ayuda en pantalla de códigos o con formatos conversacionales, es decir, por medio de formatos preestablecidos donde sólo se ingresan los datos necesarios para realizar una determinada operación. Según la complejidad de la pieza, el programador puede determinar los códigos a utilizar interpretando directamente un plano o utilizando un borrador elaborado con papel y lápiz.

1.6.5.2 Programación externa.

Para realizar una programación externa, se utilizan diferentes dispositivos. Algunas marcas disponen de simuladores individuales, los cuales tienen la facilidad de instalarse fuera del taller de máquinas para realizar la programación mas cómodamente, con más opciones de ayuda y pudiendo simular o verificar el programa elaborado.

En el caso de los controles denominados "PC-Based" (basados en PC), se pueden utilizar procesadores de texto para elaborar programas, editarlos y modificarlos. Aunque no tienen la ventaja de los simuladores, no requieren de una inversión elevada.

1.6.5.3 Programación asistida por computadora.

La programación asistida por computadora es una de las ramas de la manufactura que se ha desarrollado rápidamente en los últimos años. Para ello se utilizan los denominados sistemas de Diseño Asistido por Computadora/ Manufactura Asistida por Computadora, CAD/CAM (Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing) donde, utilizando como base un plano de la pieza, se realiza un diseño igual en la computadora mediante herramientas de dibujo del sistema y se indica sobre él las trayectorias y tipos de herramientas a utilizar por la máquina, así como los parámetros de corte, para posteriormente procesar la información y convertirla en códigos de CNC. Convertir esta información a "Lenguaje de máquina" se denomina postproceso o generación de códigos. Cada tipo de control reconoce un formato diferente de códigos, por lo que es necesario disponer del generador de códigos o postprocesador específico para cada control y modelo de máquina.

La mayoría de los sistemas CAD-CAM, así como sus respectivos postprocesadores se proporcionan en forma de software, el cual se puede instalar en una computadora.

El método de trasladar la información de la computadora es también variable. Esta se puede realizar por medio de comunicación con la máquina vía un puerto de comunicación o en red. También existen controles que tienen la capacidad de soportar unidades de disco compatibles; generalmente de discos magnéticos de 3.5"

1.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

1.7.1 Ventajas de las máquinas CNC comparadas con las antiguas máquinas CN.

La maquinaria CNC tiene características y posibilidades superiores a las ofrecidas por las máquinas simplemente CN; algunas de ellas son las siguientes:

1. Reducción del hardware necesario para añadir funciones a una máquina. Estas se pueden agregar simplemente cargando el software necesario en la computadora del MC.
2. El programa de CNC puede ser escrito, almacenado y ejecutado directamente en la máquina CNC.
3. Al estandarizarse los formatos alfanuméricos, se pueden escribir programas en editores de texto e importarlos al control de la máquina.
4. Cualquier porción del programa ingresado a la máquina, puede ser revisado, editado y simulado con recorridos de herramientas.
5. Se puede almacenar gran cantidad de programas diferentes en la MCU.
6. Muchas máquinas pueden ser conectadas juntas a una computadora central. Los programas pueden ser escritos en la computadora principal y cargarse a todas las máquinas en la red, esto se conoce como Control Numérico Directo (DNC).

7. Muchos sistemas DNC pueden aun ser conectados en red, formando mayores distribuciones de control numérico.

1.7.2 Desventajas para acceder a la utilización de tecnología CNC.

La maquinaria de Control Numérico por Computadora ha aumentado la productividad. Pero una producción CNC sólo se materializará si se cuenta con los recursos para acceder a esta tecnología y mantenerla funcional, algunos de los aspectos críticos son los siguientes:

1. Suficiente capital debe ser invertido para la adquisición de equipo CNC con los estándares de calidad suficiente.
2. El equipo requiere de mantenimiento periódico por parte de personal calificado. Esto solo se logra con contratos de servicio posventa o con personal calificado en planta.
3. El personal (operario) debe tener la capacitación suficiente para la preparación de la máquina CNC para la producción, así como la operación.
4. La planeación de la producción debe realizarse cuidadosamente, debido a que el costo por hora de producción CNC es usualmente mucho mayor al de la maquinaria convencional.
5. Muchas veces se requiere la contratación de programadores a pie de máquina o de programadores en sistemas CAD-CAM para poder manufacturar piezas complicadas.
6. Al ser en su mayoría equipo de procedencia extranjera, se debe asegurar el abastecimiento de refacciones en un periodo de tiempo que no sea excesivo para evitar la pérdida de la productividad.

Capítulo 2.

Herramientas de corte.

2.1 HERRAMIENTAS PARA OPERACIONES DE BARRENADO Y FRESADO.

Además de determinar el tipo y las características principales de la máquina-herramienta que se necesita para efectuar algún proceso de corte, es necesario saber que tipo de herramientas, sus características principales y los parámetros de corte que se deben utilizar según el tipo de máquina y proceso a realizar. Por lo tanto, al no considerar las herramientas de corte como una variable en la selección de una máquina-herramienta CNC se puede llegar al caso de que la máquina no tenga la capacidad para emplear algunas herramientas o trabajar con ciertos parámetros de corte necesarios para efectuar un proceso de manufactura.

Un operador de maquinaria o programador de CNC debe saber que herramientas son las adecuadas para efectuar un proceso de corte, y estar completamente familiarizado con todo tipo de operaciones que puedan ser realizadas o programadas en una máquina-herramienta CNC. El número y tipo de operación que se puede realizar en cada uno de los diferentes tipos de máquinas-herramienta es limitado, ya que no existe una máquina universal que pueda realizar cualquier operación de corte. En el caso de nuestro caso, debido a la naturaleza de nuestro trabajo, de ahora en adelante enfocaremos nuestro análisis a las operaciones realizadas en fresadoras o centros de maquinado verticales, aunque muchas de las operaciones que se realizan en este tipo de máquinas pueden ser realizadas también en otro tipo de máquinas-herramienta como tomos, taladros, fresadoras horizontales, etc. Por otra parte no solo el tipo de operación es importante, el tipo de herramienta de corte a utilizar es también un elemento primordial y muchas veces es el factor crítico y de mayor dificultad en una buena planeación de la manufactura.

En los procesos de maquinado que requieren operaciones de barrenado, es comúnmente esta la operación con la que se inicia el proceso de corte en fresadora. Otras

operaciones de corte como el mandrinado (boring), rimado (reaming), machueado (tapping), acabado y redimensionado (counterboring) y avellanado (countersinking) también son de considerable importancia. Otras operaciones con gran aplicación en CNC son perfilado (profile), ranurado (grooving), careado (face milling) y el fresado (milling). Todas estas aplicaciones se discuten a continuación.

2.1.1 Herramientas para operaciones de barrenado.

Las brocas usualmente no producen cavidades de alta precisión. Para dar a la cavidad las características de precisión en dimensión, posición, acabado y configuración interna, otras herramientas deben ser utilizadas. Estas pueden ser rimas, herramientas para mandrinar (borers), y machuelos.

2.1.1.1 Brocas helicoidales (Twist drill).

La herramienta más importante utilizada en operaciones de barrenado es la broca helicoidal. Esta herramienta de corte en la punta tiene dos canales helicoidales y alabes que cortan alrededor de un centro llamado punta de filo (drill tip). Estos alabes funcionan como aristas de corte para avanzar la herramienta dentro del material de trabajo y los canales para admitir lubricante y llevar hacia afuera la viruta de material (Fig. 2.1). El cuerpo de la broca (web) proporciona el soporte para resistir la flexión. Las brocas helicoidales son fabricadas de una amplia gama de materiales desde acero al carbono hasta carburo sólido. Sus diámetros varían como sigue.

En sistema Ingles:

- Por número - desde 1 (0.228") hasta 97 (0.0059").
- Por letra - desde A (0.235") hasta Z (0.413").
- En fracciones - desde 1/64" hasta 63/64" .

En sistema métrico:

- Desde 0.2 mm hasta 50.5 mm.

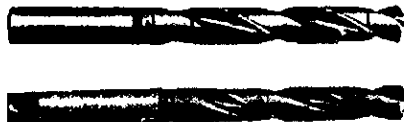


Figura 2.1 Broca helicoidal.

El zanco recto es común para brocas hasta de $\frac{1}{2}$ ". Brocas mayores pueden tener zanco recto o cónico. Los destalonados (tang) del zanco cónico previenen un deslizamiento de la broca mientras se realizan una operación severa.

La precisión del barreno tiende a disminuir cuando se aumenta tanto la longitud como el diámetro de la broca. Brocas mas largas presentan menos rigidez y mayor flexión por torsión. Como regla general se debe seleccionar la broca más corta posible para cualquier operación de barrenado. Cuando se realiza un barreno pasado se recomienda pasar la broca un tercio del diámetro mas 100 milésimas para dar un buen terminado a la parte opuesta del material (Fig. 2.2).

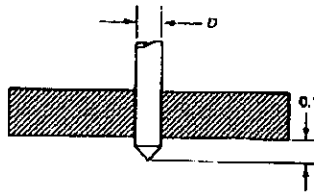


Figura 2.2 Condiciones recomendadas para taladrado.

2.1.1.2 Brocas de centros (Center Drills).

Como ya se ha aclarado, las brocas helicoidales no son capaces de posicionar el centro del barreno programado con la suficiente precisión debido a varios factores como son la longitud de corte, el diámetro de la broca, la flexibilidad de la broca, el afilado de la punta de corte, la dureza del material, etc. Para localizar mejor el centro de un barreno, una broca corta pequeña y gruesa llamada broca de centros es utilizada primero. La perforación inicial resultante es usada para guiar la broca helicoidal dentro del material con un mínimo de inexactitud. Enseguida se ilustran tanto una broca para punta de centro a 60° (bell type) y una broca de centros para trazo (spotting & centering drill) (Fig. 2.3).



Figura 2.3 Brocas de centros; broca a 60° y para trazo.

Una práctica adecuada es crear un barreno de centro a tal profundidad que el diámetro del agujero avellanado sea aproximadamente de 0.003" a 0.006" mayor que el diámetro correspondiente de broca.

2.1.1.3 Brocas con vena de refrigeración (Coolant-fed drills).

Las brocas con vena de refrigeración tienen una o dos cavidades que pasan a través de su zanco hasta la zona de corte. Por esta cavidad puede circular aire a presión, aceite o fluido de corte. Este sistema posibilita la refrigeración tanto de la herramienta como de la pieza de trabajo y ayuda a la viruta a ser expulsada; este sistema se utiliza para brocas usadas en barrenos profundos y aumenta la vida de la herramienta (Fig. 2.4).



Figura 2.4 Broca con vena de refrigeración.

2.1.1.4 Brocas de espada (Spade Drills).

Una broca de espada consiste en un sujetador portacuchilla en la cual se atornillan diferentes tamaños de cuchillas. Las brocas de espada ofrecen muchas ventajas sobre las brocas helicoidales para realizar barrenos con diámetros de 1" y mayores. La mayor longitud del filo en la punta de la cuchilla asegura que durante la penetración se ocasione menos flexión y de esta forma se obtenga un barreno de mayor precisión. Los costos de herramientas disminuyen debido a que un solo sujetador estándar puede ser utilizado con un rango de anchos de cuchilla. Normalmente existen brocas de espada en un rango desde 5/8" hasta 6". Las cuchillas gastadas pueden ser también reafiladas o simplemente reemplazadas por otra nueva. De esta forma, el tiempo de preparación para la operación también se reduce. Las brocas de espada están diseñadas para maquinarse un barreno en sólido en una sola pasada eliminando la necesidad de brocas de centros o la utilización de múltiples brocas para gradualmente agrandar el tamaño del barreno.

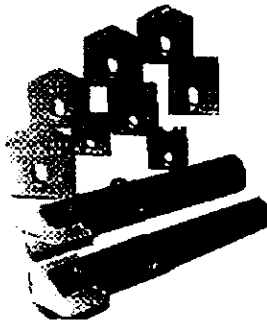


Figura 2.5 Brocas de espada. Cuchillas reemplazables y portacuchillas.

Para utilizar una broca de espada, es necesario disponer un 50% o más del torque que se utilizaría en una operación normal de barrenado con una broca helicoidal. También se requiere de una sujeción y máquina que proporcionen alta rigidez.

Muchas brocas de espada operan con enfriamiento a través de la herramienta para disipar más eficientemente el calor y desalojar la viruta. Para esto, generalmente es utilizado un sistema de refrigeración de alta presión. La profundidad de los barrenos que se pueden realizar con brocas de espada es limitada debido a que no existen álbes que ayuden a sacar la viruta. El filo principal de la cuchilla contiene rompe virutas para reducir su tamaño y facilitar su desalojo

2.1.1.5 Brocas con insertos intercambiables (Indexable insert drills).

Este tipo de brocas representan el último avance en herramientas para operaciones de taladrado en rangos de 5/8 a 3" con tecnología CNC. Estas ofrecen todas las ventajas de las brocas de cuchilla incluyendo insertos intercambiables. Estos son capaces de barrenar en sólido en rangos de penetración desde 5 hasta 10 veces mas que las brocas helicoidales o las brocas de espada. Los insertos de carburo de alta resistencia permiten a la herramienta penetrar en materiales de alta dureza. Las fuerzas a las que se someten durante el avance no son tan altas como en las brocas helicoidales, aunque se requiere mayor fuerza de corte, por lo que se necesita mayor potencia en el husillo.

Un sistema de refrigeración a presión es necesario además de suficiente rigidez de la máquina. Su principal desventaja es que se manufacturan de material frágil y son sensibles al impacto. Un uso inadecuado ocasiona falla del inserto fácilmente.

2.1.1.6 Brocas de doble margen.

La utilización de estas herramientas elimina la necesidad del rimado en muchas aplicaciones debido a que cuentan con un doble filo "margen" en cada álbe, el primero de los filos corta mientras el segundo elimina la rebaba. Las brocas de doble margen generalmente se producen solamente en carburo sólido. Estas características logran una mayor rapidez del proceso con gran precisión. Su diseño proporciona gran estabilidad y mejora el paso de refrigerante por lo que se evita el calentamiento de la pieza de trabajo brindando un mejor acabado y aumentando la vida útil de la herramienta. Se tiene su aplicación en aleaciones de acero, inconel, aceros al bajo carbono, aceros inoxidable, titanio, fundiciones de hierro y materiales no ferrosos.

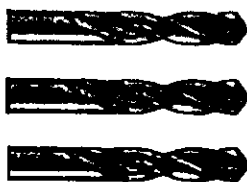


Figura 2.6 Brocas de doble filo o "margen".

2.1.2 Herramientas para operaciones de corte posteriores al barrenado.

Una vez que se ha efectuado una operación de barrenado, muchas veces es necesario dar cierto acabado o alguna característica geométrica especial al barreno, para ello se efectúan operaciones tales como el mandrinado, rimado, machueleado, avellanado, etc.

2.1.2.1 Mandrinado (Boring).

El mandrinado es usado para dos propósitos generales: agrandado de barrenos existentes y para la reubicación con mayor precisión del centro del barreno ya agrandado. Mejor precisión geométrica y acabado superficial también se obtienen con procesos de mandrinado. Algunas herramientas típicas para mandrinado se muestran en la figura 2.7.

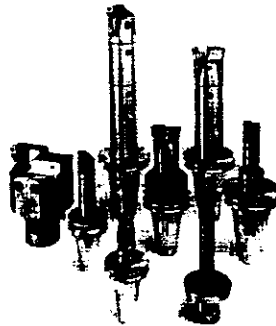


Figura 2.7 Herramientas para mandrinar con insertos de carburo.

Como una regla práctica se debe seleccionar la longitud de barra tan corta como sea posible para cualquier operación. Al igual que con las brocas, entre mayor sea la relación longitud/diámetro; mayor será la flexión y por tanto menor la precisión obtenida, además de que el acabado superficial dentro del barreno también será deficiente debido a que a mayor longitud de la barra, mayor será la vibración.

2.1.2.2 Rimado (reaming).

Como se señaló anteriormente, con una broca helicoidal no es posible obtener una dimensión exacta ni un buen acabado. Si se requiere un alto grado de precisión, una operación adicional denominada rimado, debe ser efectuada.

Una rima es una herramienta cilíndrica con aristas de corte verticales o helicoidales. La mayoría de las rimas son fabricadas con acero de alta velocidad (HSS). También existen rimas con carburo en las puntas o de carburo sólido, así como rimas de acero de alta velocidad con cobalto. Las rimas pueden cortar tanto lateralmente como en la punta. El tipo del barreno, sus dimensiones y el número requerido en la producción determinan el tipo de rima a utilizarse. Como una regla general, una rima de álabes rectos se utiliza como una

herramienta de uso general. En barrenos ciegos, si la viruta ocasiona problemas, una rima de álabes con espiral derecha puede ser utilizada para expulsar la viruta.

Las rimas con corte lateral (shell rimers) son una forma muy económica de maquinar barrenos mayores a $\frac{1}{4}$ ". En un zanco especial se pueden montar varios tamaños de puntas de rima. Algunas rimas típicamente utilizadas son mostradas en la figura 2.8.



Figura 2.8 Rimas de álabes rectos, álabes con espiral e intercambiable con árbol portaherramienta.

Debe recalcar que una rima debe ser guiada por un barreno existente. Además no se puede utilizar para corregir la geometría o posición del barreno, si existe este problema, primero se debe realizar una operación de mandrinado y después rimar.

2.1.2.3 Machueleado (tapping).

El proceso de corte de roscas en el interior de un barreno utilizando un machuelo es llamado machueleado. Este puede ser un proceso delicado y difícil dependiendo del tipo de material y la profundidad de la rosca, siendo el principal problema en el machueleado el desalojo de la viruta del barreno. Los machuelos son fabricados de una variedad de materiales como acero para herramientas, acero de alta velocidad (HSS) y en ocasiones de carburo. Estas herramientas son clasificadas de acuerdo a su tamaño. Las herramientas más pequeñas son llamadas "machuelos de tornillo" (screw taps) y los más grandes "machuelos de mano" (hand taps). Ambos tipos de machuelos son apropiados para máquinas CNC. Los machuelos de tornillo cubren un rango de 0 (0.060 pulg.) hasta 12 (0.1260 pulg.). Los de mano un rango de $\frac{1}{4}$ hasta 1 1/2 pulg. y se utilizan en juegos de tres: cónico (taper), semicónico (plug), y recto para fondear (bottoming). El machuelo cónico es usado para iniciar la rosca, además es usado para barrenos pasados o barrenos ocultos. Un machuelo semicónico tiene menor conicidad y es usado para barrenos pasados y ocultos obteniendo roscados menos profundos. El machuelo recto está achaflanado en sus extremos pero no tiene cuerpo cónico. Este es usado en casos donde la cuerda completa debe ser hecha en un corte hasta el fondo en un barreno oculto. Otro tipo de machuelos incluyen: gavilanes en espiral, para admisión de lubricante y extracción de viruta y machuelos carentes de gavilanes para formación de viruta por enrollamiento del material en lugar de viruta trozada. Algunas herramientas típicas para machuelear son mostradas en la figura 2.9.



Figura 2.9 Herramientas “de mano” para machuelear. De izquierda a derecha: para fondrear, semicónico, cónico y con álabes en espiral.

Existen tablas estándar para seleccionar las brocas y los tamaños del machuelo. La selección adecuada de una broca garantiza el material suficiente para la formación de las roscas.

2.1.2.4 Agrandado y acabado (counterboring).

Es en ocasiones deseable agrandar un barreno ligeramente hasta el diámetro de la cabeza de un tornillo específico o un perno hasta la profundidad que permita que la cabeza sea asentada más abajo de la superficie maquinada. Una herramienta para agrandar es usada para este propósito. Este consiste de tres a ocho gavilanes de corte o de insertos intercambiables para operaciones de CNC. Estos cortadores agrandan el barreno hasta donde sea requerido.

Algunas cavidades de mayores dimensiones pueden ser también maquinadas con una herramienta de este tipo. Este tipo de herramientas son ilustradas en la figura 2.10.



Figura 2.10 Cortadores para agrandar y acabar. Cortador con zanco recto y zanco cónico.

2.1.2.5. Avellanadores (countersinking).

El avellanamiento es concerniente al ensanchamiento del extremo superior de un barreno en forma de un cono. Esto permitirá alojar la cabeza de un tornillo o pija ubicándolo ligeramente abajo de la superficie cuando sea insertado. El ángulo del cono es usualmente de 82° o 90° . Los barrenos roscados deberán ser avellanados ligeramente más grandes que el diámetro del machuelo para proteger el inicio de la cuerda a menos que se indique lo contrario en los planos de fabricación.

2.1.3. Herramientas para fresado de perfiles y operaciones de careado.

Perfilar es el proceso de crear un contorno por la remoción de material con un cortador que contenga dientes o gavilanes en su periferia. La operación de careado tiene por

fin la creación de una superficie plana con pasos sucesivos de un cortador para planear (Face mill) o un cortador vertical (end mill) (Fig. 2.11).



Figura 2.11 Cortador vertical para carear.

En un perfilado, el eje de rotación de un cortador es paralelo a la superficie de maquinado. En un careado, el eje de rotación del cortador es perpendicular a la superficie de maquinado. Ambas operaciones mantienen un mismo patrón de movimiento continuo en el cual la herramienta se mantiene en contacto con el material.

2.1.3.1 Cortadores verticales (End Mills).

La herramienta que se usa más a menudo para las operaciones de perfilado es el cortador vertical. Este es particularmente usado en las operaciones de CNC pues requiere de un mínimo de preparación cuando la producción es pequeña o mediana. Los End Mills son también usados para operaciones de careado, ranurado, penetración o fabricación de cavidades (Fig. 2.12). El rango en tamaño de estos cortadores va de 0.032 a 2 pulg. en diámetro.



Figura 2.12 Cortador vertical sin corte al centro.

Los cortadores verticales son manufacturadas con dos, tres, cuatro o más gavilanes. Los gavilanes son helicoidalmente acanalados para la extracción de viruta y permitir el paso de lubricante o refrigerante. El cortador vertical mostrado en la figura 2.12 no tiene dientes finales que vayan a lo largo de su centro. Esto provoca que no pueda ser usado para penetrar directamente al centro de un material sólido. En el extremo de los dientes de la fresa de dos gavilanes mostrada en la figura. 2.13 es posible realizar cortes a través de su centro. Esta herramienta es llamada cortador vertical con corte al centro (Center Cutting Mill) y puede ser manufacturado con tres o más gavilanes. Esta herramienta puede ser usada para desbaste taladrando barrenos en sólido, para agrandado y acabado, mandrinado, así como ranurado, y maquinado de cavidades. Los barrenos que han sido taladrados con una broca pueden ser dimensionados con un alto grado de precisión utilizando un cortador vertical.



Figura 2.13 Cortador vertical de dos gavilanes con corte al centro.

Existen cortadores verticales con un alto desempeño para el arranque de viruta; estos son conocidos como cortadores verticales de desbaste (Hogging Cutters). Estos tienen ranuras o escamas alrededor del cuerpo y producen un efecto de rompe-viruta. Estos generan en uno de sus lados menor carga comparados con los cortadores helicoidales planos. Estos factores permiten que los cortadores de desbaste remuevan material con una rapidez tres veces mayor que el usual por los cortadores verticales (Fig. 2.14).



Figura 2.14 Cortador vertical de desbaste.

2.1.3.2 Cortadores para corte plano y frontal (Shell end mills).

Este tipo de fresas están en un rango de tamaño de 1/4 a 6 pulg. en diámetro. Operaciones de planeado usualmente son realizadas con estas herramientas. Estas representan un ahorro porque diversos cortadores pueden ser montados en un mismo árbol (Fig. 2.15).

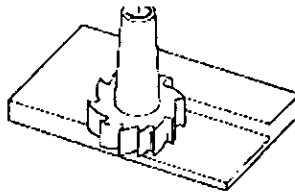


Figura 2.15 Cortador para planeo y corte frontal.

2.1.3.3 Cortadores verticales con insertos de carburo intercambiables (Carbide indexable insert end mills).

La moderna tecnología empleada en el diseño de herramientas ha permitido obtener cortadores para fresa con insertos de carburo reemplazables o indexables. Con diversas pruebas se ha demostrado que el aumento del rendimiento de estas herramientas es substancial ya que se ahorra tiempo de preparación y costos de rectificado. El inventario es reducido porque la misma portaherramienta puede ser usada para cortar diferentes materiales en ciertas aplicaciones cambiando solamente de insertos. Los insertos se pueden adquirir de diferentes formas y tamaños. La forma determina la fuerza y el número de aristas de corte. Los insertos circulares son los más resistentes seguidos de los hexagonales, cuadrados, forma de paralelogramo, forma de diamante y triangular.

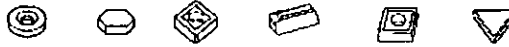


Figura 2.16 Insertos para cortadores verticales de formas circular, hexagonal, cuadrado, paralelogramo, diamante y triangular.

Los operadores de CNC deben seleccionar la forma, el tipo de filo, así como el grado (propiedades físicas del carburo) del inserto, según la aplicación de corte.

Debido a que estas herramientas son muy rígidas, un alto grado de precisión puede ser alcanzado con su uso alcanzándose altos avances y velocidades de corte, lo que aumenta enormemente la productividad. Aunque para ser bien aprovechadas estas características se requiere maquinaria con grandes capacidades en cuanto a potencia y rigidez.

Muchos de los insertos para fresado actualmente se producen con recubrimientos especiales. Estos recubrimientos se pueden aplicar también directamente sobre herramientas de alta velocidad. El recubrimiento más popularmente utilizado es el Nitruro de Titanio en diferentes calidades y variantes de composición. Los recubrimientos ayudan a disminuir la sensibilidad a los impactos y la fragilidad. El carburo de titanio reduce también la fricción y el desgaste en las aristas de corte.

2.2 MATERIALES PARA HERRAMIENTAS DE CORTE.

Actualmente se dispone de una gran variedad de materiales para la fabricación de herramientas de corte. La selección del material adecuado de una herramienta depende de factores como la operación de corte de que se trate, la máquina que se va a usar, el material de la pieza de trabajo, las necesidades de producción, el costo, el acabado y exactitud superficial deseados. Las principales cualidades requeridas en una herramienta de corte son:

1. Dureza en caliente. (la conservación de la dureza del material a altas temperaturas).
2. Tenacidad. (la propiedad del material a resistir los impactos).
3. Resistencia al desgaste.

Los materiales para herramientas de corte incluyen aceros al carbono, aceros de mediana aleación, aceros de alta velocidad, aleaciones fundidas, carburos cementados, cerámicas u óxidos y diamantes, cuyas características se mencionan a continuación.

2.2.1 Aceros para herramientas.

Los aceros al carbono para herramientas son el tipo más antiguo de acero empleado en las herramientas de corte. Los aceros al carbono para herramientas se han utilizado para brocas que trabajan a velocidades más o menos bajas, (hasta 300 rpm) para machuelos, brochas y escariadores, aunque ya los han sustituido otros materiales para herramientas.

Los aceros de alta velocidad para herramientas son un grupo de aceros con gran cantidad de aleantes y que conservan su dureza, resistencia mecánica y filo durante un periodo relativamente prolongado de uso. Estos aceros se emplean mucho en operaciones en que se utilizan herramientas de forma, para taladrar, escariar, fresar, brochar, machuelear, etc.

Para reconocer los diferentes tipos de aceros para herramientas hay que saber la función que desempeñan los diferentes elementos de aleación. Estos elementos se agregan para obtener:

1. Mayor dureza y resistencia al desgaste.
2. Mayor tenacidad al impacto.
3. Mayor dureza en caliente en el acero, de modo que ésta se conserve a altas temperaturas de corte.
4. Una reducción en la distorsión y el pandeo durante el templado cuando éste se requiera.

2.2.2 Carburos cementados.

Los materiales hasta ahora mencionados han sido utilizados prácticamente en todos los procesos comunes de maquinado hasta hace pocos años. Excepto para algunas aplicaciones muy especiales en que se han utilizado materiales como los carburos desde hace varias décadas, aún hoy en día en la mayoría de los talleres mecánicos para mantenimiento y fabricación especial, se utilizan muy pocas veces herramientas de corte cuyo material no sea acero rápido.

Aún con la resistencia que ofrecen muchos usuarios a nuevos materiales para herramientas, las exigencias actuales y el nuevo diseño de la maquinaria CNC amplían la aceptación de esta nueva generación de materiales, donde ante la reducción de tiempo, mejora en el acabado y la precisión y la disminución del costo por pieza; no cabe duda de la superioridad de estos materiales en muchas aplicaciones. Por ello se considera conveniente plantear los conceptos básicos en este campo.

2.2.3 Metales duros.

Los metales duros, como su nombre lo indica es un material de corte hecho de partículas duras, generalmente carburos, unidas por un aglomerante. Tiene una ventajosa combinación de propiedades para el mecanizado y junto con el acero rápido, ha dominado el desarrollo del mecanizado a elevadas velocidades de corte. En la industria de alta tecnología los metales duros recubiertos se han impuesto de tal modo que actualmente las calidades no recubiertas han pasado a segundo plano. Los metales duros sin recubrir se utilizan ahora para mecanizar aluminio, soluciones especiales y complementarios.

El metal duro es un producto pulvimetalúrgico, fabricado principalmente con un número de diferentes carburos mezclados.

Los carburos cementados tienen carburos metálicos como ingredientes básicos y se fabrican con técnicas de metalurgia de polvos. Tienen las siguientes propiedades que los convierten en buenos materiales para herramientas de corte:

- a) Elevado módulo de elasticidad, dos o tres veces el del acero.
- b) Alta dureza en un amplio rango de temperaturas.
- c) No presentan flujo plástico aunque se someta a esfuerzos muy elevados.
- d) Baja expansión térmica.
- e) Alta conductividad térmica.

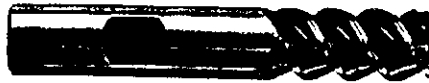


Figura 2.17 Cortador vertical de Carburo sólido.

Principalmente se utilizan carburo de Tungsteno (WC), carburo de Titanio (TiC), carburo de Tantalio (TaC) y carburo de Niobio (NbC). El aglomerante es en su mayor parte Cobalto (Co).

Los carburos cementados se emplean como insertos (plaquitas) intercambiables que se sujetan con dispositivos mecánicos especiales o puntas que se sueldan en un mango de acero. Cuando se unen por soldadura se tiene un cuidado especial del proceso debido a la diferencia de los coeficientes de expansión. Los insertos intercambiables se encuentran en muy diversas formas, diseños y composiciones.

Hay tres grupos generales de carburos cementados:

- 1) Carburos de Tungsteno aglutinado con cobalto, que se emplea para maquinarse hierros fundidos y metales abrasivos no ferrosos.
- 2) Carburo de Tungsteno con aglutinante de cobalto más una solución sólida de WC- TiC-TaC-NbC, para maquinarse en aceros.
- 3) Carburos de titanio con aglutinante de níquel y molibdeno, para cortar en donde hay altas temperaturas debido a las altas velocidades de corte o a la alta resistencia mecánica del material de la pieza de trabajo.

Las propiedades de los carburos se designan por ANSI (American National Standard Industry) como "grados". Estos grados se representan como grado C-1, grado C-2, etc., aunque actualmente la ISO (International Standard Organization) está creando un nuevo sistema de numeración con el empleo de las letras P, M y K y números del 01 al 50). Los grados 1 a 4 se recomiendan para maquinarse con hierro fundido y materiales no ferrosos y no metálicos; los grados 5 a 8 son para maquinarse acero y sus aleaciones. Los grados 1 a 5 son para desbastar, los 2 a 6 son para uso general, 3 y 7 son para acabado y 4 y 8 son acabados de precisión. Existen otros grados para diversas aplicaciones y según lo riguroso de la operación de maquinado. También las diferentes firmas productoras de herramientas de corte como Valenite, Kennametal, Iscar, etc. identifican sus productos con nomenclaturas equivalentes (Fig. 2.18).

GRADO ISCAR	ISO	ANSI	MATERIAL DE TRABAJO	APLICACIONES RECOMENDADAS
IC 10 SIN RECUBRIMIENTO	K20-K30	C2 - C3	Fundición gris con más de 220 HBN, fundición de hierro maleable, aluminio, aleaciones de cobre, madera, aleaciones resistentes a altas temperaturas	Semidesbaste. Alta resistencia al desgaste. Bajas velocidades. Medios avances, cortes interrumpidos.
IC- 20 SIN RECUBRIMIENTO	K10-K20	C2 - C3	Fundición gris con más de 220 HBN, Fundición de hierro maleable, aluminio, aleaciones de cobre, FRP, laminado fenólico, concreto, aleaciones resistentes a altas temperaturas, acero inoxidable	Medio maquinado, acabado. Alta resistencia al desgaste, avances medios.
IC - 28 SIN RECUBRIMIENTO	P30-P40	C1 - C2	Aleaciones resistentes a altas temperaturas, acero inoxidable austenítico, aleaciones de acero, HSS	Desbaste. Bajas velocidades. Altos avances. Cortes interrumpidos.
IC - 70 SIN RECUBRIMIENTO	P10-P30	C6 - C7	Acero, Fundición de acero, fundición de hierro maleable, HSS Acero inoxidable martensítico	Desbaste. Medias velocidades. Medios avances. Deformación plástica baja.
IC - 50M SIN RECUBRIMIENTO	P30	C6	Acero Fundición de acero, fundición de hierro maleable, acero inoxidable.	Desbaste. Altos avances. Cortes interrumpidos
IC - 54 SIN RECUBRIMIENTO	---	C4 - C5	Acero, Fundición de acero con cavidades, acero inoxidable austenítico, fundición de acero inoxidable.	Desbaste Altos avances. Cortes interrumpidos.
IC - 8084 RECUBIERTO CON CVD	P05-P35 K05-K20	C3 C6 - C7	Acero al carbono. Acero para herramientas, Aleaciones de acero, acero inoxidable, Fundición de acero, fundición de hierro gris.	Acabado. Medio maquinado. Alta resistencia al desgaste. Altas velocidades. Medios avances.
IC - 8005 RECUBIERTO CON CVD	P10-P35	C3 C6 - C7	Acero al carbono. Acero para herramientas, Aleaciones de acero. Fundición de acero.	Acabado, Medio maquinado. Alta resistencia al desgaste. Altas velocidades. Medios avances.
IC825 RECUBIERTO CON CVD	-----	C6 - C7	Acero. Aleaciones de acero. Acero inoxidable	Semidesbaste. Avances medios. Medias velocidades.
IC8025 RECUBIERTO CON CVD	P10-P35 K10-K30	C6 - C7	Acero. Aleaciones de acero. Acero inoxidable.	Semidesbaste. Medio maquinado. Avances medios. Medias velocidades
IC520M RECUBIERTO CON CVD	K10-K20	C2 - C3 C5 - C6	Acero. Fundición de acero. Fundición de hierro maleable. HSS. Acero inoxidable martensítico.	Acabado. Medio maquinado. Alta resistencia al desgaste. Altas velocidades. Avances medios.
IC656 RECUBIERTO CON CVD	P20-P40	C5 - C6	Acero al carbono. Acero para herramientas, Aleaciones de acero. Acero inoxidable austenítico. Acero inoxidable martensítico.	Semidesbaste. Medio maquinado. Medias velocidades. Avances altos. Avances medios. Cortes interrumpidos.
IC635 RECUBIERTO CON CVD	P30-P50	C5 - C6	Acero al carbono. Aleaciones de acero. Acero inoxidable.	Bajas velocidades. Altos avances y condiciones desfavorables.
IC418 RECUBIERTO CON CVD	-----	C2 - C3	Acero al carbono. Aleaciones de acero. Hierro fundido	Desbaste. Semidesbaste. Medias velocidades, avances altos. Cortes interrumpidos.
IC428 RECUBIERTO CON CVD	K05-K20	C3 - C4	Hierro fundido. Gris, aleado, maleable suave, maleable duro, nodular suave, nodular duro.	Acabado. Alta resistencia al desgaste. Altas velocidades. Avances medios. Baja deformación plástica.
IC450 RECUBIERTO CON CVD	---	C1 - C2 C5 - C6	Fundición gris. Hierro nodular. Acero inoxidable.	Alta resistencia al desgaste. Cortes interrumpidos.
IC328 RECUBIERTO CON PVD	---	C2 - C3	Aleaciones de acero. Aleaciones de aluminio Acero inoxidable austenítico. Acero al carbono. Fundición de acero Aleaciones de cobre. Aleaciones exóticas.	Desbaste. Bajas velocidades. Altas avances. Cortes interrumpidos. Alta resistencia a choques térmicos y mecánicos.

Figura 2.18 Tabla de comparación de nomenclatura según norma ISO, ANSI y la firma ISCAR para grados en diferentes materiales

Los carburos revestidos son insertos de Carburo de Tungsteno o algunas veces de acero al carbono revestidos con una capa delgada de carburo de titanio, nitruro de titanio u óxido de aluminio. Con el revestimiento se obtiene resistencia adicional al desgaste a la vez que se obtiene la resistencia mecánica y la tenacidad de la herramienta de carburo.

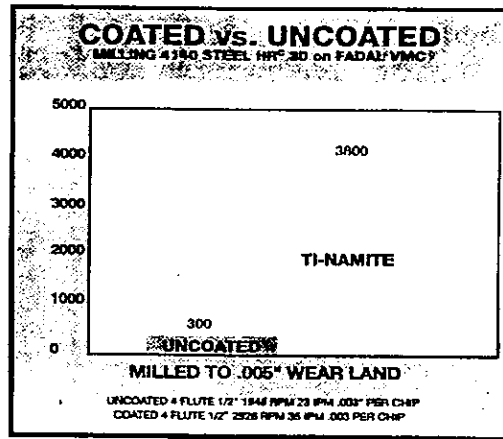


Figura 2.19 Comparación de capacidad de corte para cortadores recubiertos vs no recubiertos en centro de maquinado según la firma SGS

La rigidez es de gran importancia cuando se emplean herramientas de carburo. Los avances suaves, las bajas velocidades y la vibración o cabeceo son muy dañinos. No se necesita fluido de corte, pero si se utiliza uno para enfriamiento, se debe aplicar en grandes cantidades y sin interrupción para evitar calentamiento y templado. Para aprovechar todas las ventajas de las herramientas de carburo, se han construido máquinas-herramienta rígidas, de mayor velocidad y potencia para la optimización en el uso de estos materiales.

2.2.4 Cerámicas.

Hoy en día, cerámica es el nombre genérico para un grupo de diferentes materiales para herramientas de corte. La cerámica ya se utilizó como herramienta de corte a principios de siglo junto al acero rápido. Estas primeras herramientas de cerámica eran muy frágiles, teniendo una vida de herramienta muy corta e irregular debido a problemas de fabricación y a una utilización errónea.

Las herramientas de corte de cerámica son duras, con elevada dureza en caliente y no reaccionan con los materiales de las piezas de trabajo. Tienen una vida de herramienta muy larga y pueden mecanizar a velocidades de corte altas. Aplicadas correctamente tienen gran capacidad de arranque de viruta.

Las principales áreas de aplicación para las cerámicas son: fundición gris, aleaciones termorresistentes, aceros endurecidos, fundición nodular y otros aceros en algunos casos. La aplicación de las cerámicas con éxito depende mucho del tipo de operaciones, condiciones de maquinado, material de la pieza a maquinar, comportamiento de la máquina-herramienta, estabilidad general, el método utilizado para el maquinado y la preparación del filo de corte, etc.

2.2.5 Nitruro de Boro Cúbico (CBN).

El Nitruro de Boro cúbico (CBN), es uno de los materiales de herramientas de corte más duros, segundo después del diamante. Es un material de corte excelente, en el que se combina gran dureza, elevada dureza en caliente hasta muy altas temperaturas (2000°C), resistencia excelente al desgaste y generalmente buena estabilidad química durante el mecanizado. Es un material de corte relativamente frágil pero más tenaz que las cerámicas. Comparado con las cerámicas tiene mayor dureza, pero no tiene tan buena resistencia térmica ni química.

Es relativamente joven, ya que aunque apareció en los cincuenta, su introducción de una manera amplia fue en los setenta. Una aplicación importante es el torneado de piezas duras que anteriormente se rectificaban.

Aceros forjados, aceros y fundiciones endurecidas, piezas con superficie endurecida, metales pulvimetalúrgicos son algunas de las más típicas aplicaciones para el CBN.

Las aplicaciones de esta área deben ser analizadas cuidadosamente, puesto que tanto el CBN como la cerámica cubren en ocasiones el mismo campo de aplicación y se debe buscar la solución más económica y resultados óptimos

EL CBN debe ser aplicado para piezas de materiales muy duros, por encima de 48 HRC. Si las piezas son demasiado blandas se genera un excesivo desgaste en la herramienta. Un material más duro genera un menor desgaste. Excelentes acabados superficiales se obtienen con las herramientas CBN, haciendo del torneado una buena alternativa del rectificado.

2.2.6 Diamante policristalino.

El diamante más duro conocido es el diamante natural monocristalino, y casi tan duro es el diamante policristalino sintético (PCD). Su considerable dureza le confiere una elevada resistencia al desgaste por abrasión por lo que se utiliza en elementos como muelas de rectificar. Los finos cristales de diamante son unidos mediante sinterizado bajo altas presiones y temperaturas. Las pequeñas puntas de PCD son soldadas a placas de metal duro, lo que les añade fuerza y resistencia al impacto. La vida de la herramienta puede ser muchas veces mayor que el metal duro hasta incluso cien veces.

Sin embargo, los puntos críticos para este aparentemente material de corte ideal son:

- Las temperaturas de corte no deben exceder los 600°C.
- No se pueden utilizar en materiales ferrosos debido a su afinidad.
- No se aplica en materiales tenaces y de elevada resistencia a la tracción.

El PCD es un material relativamente nuevo, introducido en la década de los setenta. Hoy en día es utilizado en operaciones de torneado y fresado, cuando se requiere un buen criterio de acabado superficial y precisión.

Debido a la gran fragilidad por naturaleza del PCD, son necesarias condiciones muy estables, herramientas rígidas y máquinas trabajando a grandes velocidades para trabajar con PCD. Se pueden usar refrigerantes, principalmente para enfriar la zona de corte. Como se utilizan principalmente en acabado, es importante trabajar con avances y profundidades de corte pequeñas y se deben evitar cortes interrumpidos.

2.3 CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DE LOS CORTADORES VERTICALES.

El cortador vertical es la herramienta más versátil y utilizada en las operaciones de fresado tanto en CNC como en máquinas-herramienta convencionales. Por lo tanto, consideramos que es el tipo de herramienta más conveniente para analizar en esta tesis, iniciando por conocer sus características geométricas y los parámetros principales de corte que se deben considerar al aplicar este tipo de herramienta.

2.3.1 Diseño en la geometría de la herramienta.

En la geometría de corte de una fresa vertical o para planear existen varios ángulos que definen la posición del filo o inserto. El ángulo de posición (K) es el ángulo formado entre el plano maquinado por la fresa y el maquinado por el filo de corte principal. Existen otros cuatro ángulos adicionales que definen la posición del filo en una fresa.

Los dos primeros son funcionales y son el ángulo de inclinación (λ_c) medido en un plano paralelo al filo de corte principal y el ángulo de desprendimiento efectivo (γ_0) medido en un plano perpendicular al filo de corte principal [C].

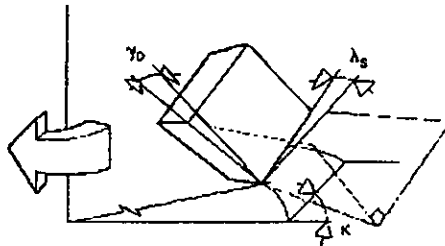


Figura 2.20 Ángulos de posición en una fresa para planear.

La variación de ambos ángulos influye enormemente en el cálculo de la potencia requerida, la fuerza tangencial de corte y la profundidad máxima para una adecuada evacuación de la viruta producida. Cuando por ejemplo el ángulo de desprendimiento es positivo, por cada grado más positivo, se ha calculado que se requiere un 1.5 % menos de potencia.

Los otros dos ángulos se designan ángulos de desprendimiento, el axial (γ_r) y radial (γ_l), estos también son conocidos como ángulo de desprendimiento lateral de la

herramienta o ángulo de desprendimiento posterior de la herramienta, respectivamente (Fig. 2.21).

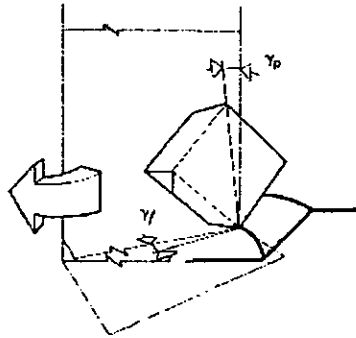


Figura 2.21 Ángulos de desprendimiento.

Los ángulos de desprendimiento axiales y radiales son medidos en el plano paralelo y perpendicular al eje rotativo de la herramienta. Estos ángulos definen el tipo de fresa, y en combinación con diferentes ángulos de posición dan lugar a los ángulos de corte funcionales que tienen las diferentes fresas.

En los más comunes tipos de fresas enteras o con insertos intercambiables existen tres diseños principales de geometría:

1. Doble negativa (Fig. 2.22).
2. Doble positiva (Fig. 2.23).
3. Positiva/negativa (Fig. 2.24).

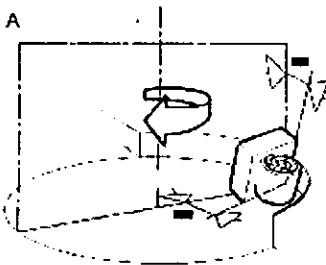


Figura 2.22 Geometría doble negativa.

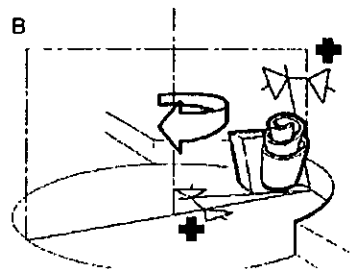


Figura 2.23 Geometría doble positiva.

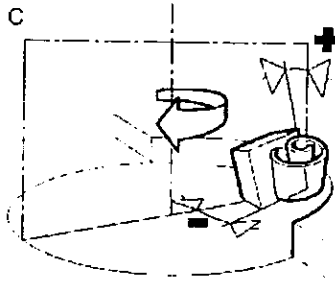


Figura 2.24 Geometría positiva/negativa.

En la doble geometría negativa, tanto los ángulos radiales como los axiales son negativos. Esto puede ser una alternativa económica puesto que se utilizan dos caras para el corte, proporcionando un número de filos mayor y más robustos. Las fresas con este tipo de geometría son adecuadas para el corte de materiales en condiciones de maquinado que implican resistencia al impacto, así como para el maquinado de aceros duros y fundición. También es recomendable la utilización de cortadores con esta geometría, si la máquina utilizada tiene los baleros del husillo (baleros sometidos a cargas axiales) en mal estado, aunque esta geometría requiere considerables demandas en cuanto a potencia y estabilidad de la máquina, debido a las grandes fuerzas de corte implicadas [C].

En la geometría doble positiva, tanto el ángulo radial como el axial son positivos requiriendo fuerzas de corte menores. La formación de viruta es en espiral y son desalojadas con facilidad. En casos de materiales dúctiles como el aluminio y aceros suaves donde existe una tendencia a la formación de recrecimientos en el filo, la fresa doble positiva es una excelente solución. También lo es si el material es muy frágil, inestable, si tiene tendencia a endurecerse al trabajarla, o si la potencia disponible es baja.

La fresa positiva/negativa tiene ángulos axiales positivos y radiales negativos. Los requerimientos de potencia son intermedios entre las doble positiva y doble negativa. Con esta geometría se alcanzan grandes profundidades de corte, combinado con un ángulo de posición de 45° puede hacer frente a trabajos que exigen grandes demandas. Esta geometría es aconsejable en fresas para ranurar donde se requiere un corte continuo con desalojo de viruta.

En cuanto a la forma del filo, enfocándose específicamente a las herramientas que cuentan con insertos intercambiables, existen hoy en día tres tipos básicos.

- a) La forma negativa, con una sección robusta y cuadrada para fresas negativas.
- b) La forma positiva, gracias a su incidencia puede utilizarse en fresas positivas.
- c) La positiva ondulada que integra una geometría positiva adicional en un inserto también positivo, aumentando el ángulo de desprendimiento y con una forma sinuosa que reduce el contacto entre las virutas y el inserto obteniéndose un corte suave.

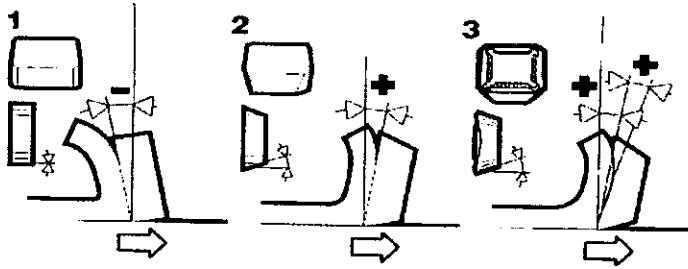


Figura 2.25 Insertos negativos, positivos lisos y positivos ondulados.

Adicionalmente se incorporan facetas, chaflanes y redondeos especiales en las aristas para mejorar los acabados, aumentar el avance máximo, etc. según la aplicación específica [C].

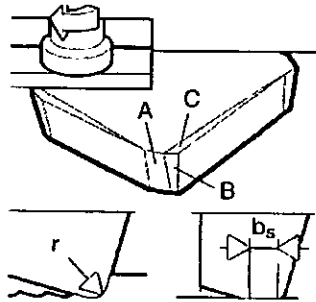


Figura 2.26 Insertos con facetas, chaflanes y redondeos.

2.3.2 Relación operación-herramienta.

El maquinado de operaciones básicas como el escuadrado, ranurado, vaciado de cavidades, fresado de forma, etc. requiere de fresado periférico, además del planeado.

El maquinado de escuadras o el contorneado es principalmente un fresado lateral, a menudo llamado canteado y conlleva tener que trabajar en dos caras. Un factor limitante en este caso puede ser la flexión de la herramienta.

El maquinado de una ranura o de un chavetero, a menudo denominado ranurado completo, conlleva el maquinado de tres caras. La ranura puede ser abierta en ambos lados, o cerrada en uno de los lados. (Las ranuras cerradas al final de ambos lados son alojamientos que requieren de fresas para ranurar, las cuales tienen la capacidad de corte de aproximadamente la mitad del diámetro, con la que debe soportar la flexión. También el diseño debe ser capaz de desalojar la gran cantidad de viruta que puede producir una máquina actual, además de tener la sujeción lo suficientemente rígida para evitar la vibración.

La fresa para ranurar es una herramienta diseñada para disponer de longitud de corte axial, y esto obviamente la hace más susceptible a los efectos de las fuerzas de corte, especialmente cuando se espera obtener un alto rendimiento.

Los efectos de las fuerzas de corte en una fresa para ranurar pueden influir considerablemente en los resultados. Las fuerzas radiales, axiales y tangenciales, trabajarán para flexionar la herramienta empujando la fresa para ranurar hacia afuera.

La fresa para ranurar puede utilizarse también pero limitadamente con avance en dirección radial y axial. La operación se denomina fresado en rampa y puede llevarse a cabo con la longitud del filo frontal (h) a determinado ángulo (α) dependiendo del diámetro del cortador (Fig. 2.27). Cuando se fresa en rampa en un alojamiento, la operación deberá comenzarse a partir del centro, maquinando hacia afuera del alojamiento para facilitar la salida de la viruta.



Figura 2.27 Posibilidad de fresado en rampa de cortador para ranuras.

El fresado de alojamientos es una operación con fuertes requerimientos, puesto que se requiere además de la capacidad de la herramienta para taladrar (avance axial) hasta una determinada profundidad y después llevar a cabo el fresado, además de poder avanzar abriendo varios cortes en rampa. La fresa para ranurar debe tener un filo de corte que atraviese el centro en la punta para taladrar hasta cierta profundidad. Las fresas de metal duro son capaces de taladrar hasta 0.7 veces su diámetro. El régimen de avance debe disminuir enormemente cuando posteriormente se dará un avance radial dentro del material.

Para operaciones especiales de copiado, contorneado y vaciado de cavidades como formas caprichosas obtenidas de un proceso de digitalización o diseño en CAD-CAM, se utilizan fresas para ranurar con filo de corte redondo, ya sean fresas con punta esférica o fresas para ranurar con insertos redondos. Estas herramientas pueden fresar en rampa hasta 30° subiendo o bajando.

2.4 EL PROCESO DE CORTE Y SUS FUERZAS.

Tomando como base la relación angular entre el vector de velocidad de corte y la punta de corte de la herramienta, los diferentes procesos pueden clasificarse en dos categorías denominadas:

- 1) Corte ortogonal.
- 2) Corte oblicuo.

En el corte ortogonal, el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección de la velocidad de corte, es decir a 90° . En el corte oblicuo, el ángulo entre el filo el vector de velocidad de corte es diferente de 90° como se observa en la figura 2.28.

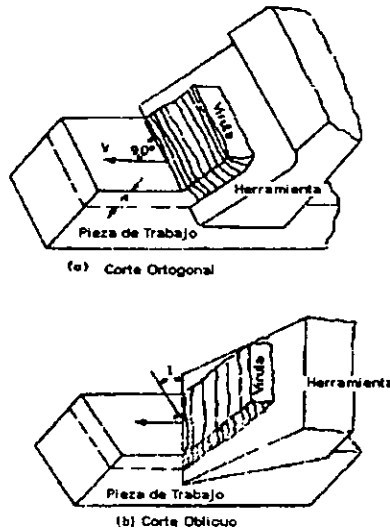


Figura 2.28 Configuración de corte ortogonal y oblicuo.

De hecho, el corte ortogonal es un caso particular del corte oblicuo cuando se cumple la condición de que la punta de la herramienta es perpendicular al vector de velocidad de corte. Por esto cualquier análisis del corte oblicuo se aplica al corte ortogonal. Debido a que el proceso de corte oblicuo es mucho más difícil de analizar, la mayoría de los autores se han enfocado al análisis del corte ortogonal solamente. Sólo muy recientemente, pocos autores han intentado entender el mecanismo del corte oblicuo. Nuestro trabajo se basa en la aceptación del corte ortogonal, por lo que a continuación se discute la formación de viruta, al análisis del corte ortogonal, sus características geométricas y las componentes de sus fuerzas. También se expone brevemente el principio del corte oblicuo.

Por otra parte, se sabe que en la zona del material cercana a la herramienta se sufre una deformación plástica, antes de comenzar a formar la viruta. Esta zona plástica es de dimensiones significativas para el análisis; sin embargo, la mayoría de los autores han tratado de simplificar el análisis tan complejo asumiendo que sólo existe una zona de deformación de espesor infinitesimal, llamada plano de desprendimiento (shear plane). También esta simplificación es aceptada y utilizada en nuestro trabajo.

2.4.1 Formación de viruta.

Todos los procesos de maquinado involucran la formación de viruta deformando cierta zona del material de trabajo con la ayuda de una herramienta de corte. Por esto, lo extenso de la deformación que sufre el material no solo determina el tipo de viruta, también determina la calidad de la superficie maquinada (refiriéndose a la microestructura, rugosidad y esfuerzos residuales), las fuerzas de corte, las temperaturas obtenidas y la precisión dimensional del trabajo durante el proceso de corte [D].

Un indicador de las características del proceso realizado es el tipo de viruta obtenida, que en una clasificación general se pueden dividir en tres:

- 1) Viruta continua.
- 2) Viruta continua con recrecimiento en la punta de la herramienta (built-up-edge).
- 3) Viruta discontinua.

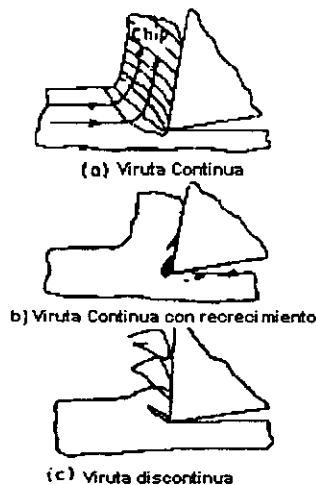


Figura 2.29 Diferentes tipos de viruta.

2.4.1.1 Viruta continua.

Durante el proceso de corte de materiales dúctiles como aceros al carbono, cobre, bronce y aleaciones de aluminio, etc. se produce una viruta continua que forma una espiral. La presión de la herramienta hace que el material cercano a la punta de la herramienta se deforme plásticamente. Generalmente se somete a compresión y desprendimiento. El material entonces se desliza sobre la cara de contacto (rake face) hasta determinada longitud y después abandona la herramienta. La fricción entre la viruta y la herramienta puede producir una deformación adicional en la viruta. La zona plástica cercana a la punta de la herramienta es llamada la zona primaria de deformación y la zona de deformación sobre la cara de la herramienta usualmente es llamada la zona secundaria de deformación. La formación de ambas zonas y el deslizamiento sobre la cara de la herramienta producen calor que incrementa la temperatura de la herramienta.

El tamaño de la zona primaria de deformación depende de:

- 1) El ángulo de incidencia de la herramienta (rake angle).
- 2) Velocidad de corte.
- 3) Características del material de trabajo.
- 4) Fricción en la cara de contacto.

Con grandes ángulos de incidencia, la transición del material a viruta es gradual y el material sufre menos deformación global. Las fuerzas de corte son, por tanto bajas. Con pequeños o negativos ángulos de incidencia, el material es deformado más severamente y las fuerzas involucradas son mayores.

Con altas velocidades de corte, el espesor de la zona primaria de deformación disminuye, volviéndose más estrecha; también el incremento de la fricción en la cara de contacto puede ocasionar un incremento en el tamaño de las zonas y primaria y secundaria de deformación. Otras características que influyen en el tamaño de la zona primaria son:

- 1) Tenacidad.
- 2) Endurecimiento por deformación.
- 3) Deformación previa.
- 4) Conductividad térmica.

2.4.1.2 Viruta continua con recrecimiento en la punta de la herramienta (Built-up-edge).

Como ya se mencionó, la temperatura es alta en la zona de interfase material-herramienta durante el corte debido a que el material se desliza bajo una gran presión antes de ser transformado en viruta libre. Bajo estas condiciones, una pequeña porción del material se adhiere a la cara de contacto de la herramienta transfiriéndole su calor y endureciéndose más que el resto del material.



Figura 2.30 Variación periódica del BUE.

Este proceso continúa incrementando el recrecimiento de la punta de la herramienta (BUE) hasta un punto crítico en el cual el BUE se desprende por su tamaño excesivo para después volver a iniciar una nueva formación de BUE. Estos pequeños fragmentos se incrustan ya sea en la superficie maquinada provocando un acabado pobre parecido a un "punteado" o se incrusta en la demás viruta. Al incrementar la velocidad de corte, aumenta la temperatura de interfase, lo que suaviza el BUE disminuyendo su tamaño crítico. Por tanto al obtener una velocidad lo suficientemente alta el BUE desaparece por completo.

2.4.1.3 Viruta discontinua.

Este tipo de viruta es producida durante el corte de materiales frágiles como algunas fundiciones grises, bronce con altos porcentajes de Zinc, etc. En el proceso de formación de viruta el material solo sufre un muy pequeño porcentaje de deformación y un desprendimiento rápido cuando existe un leve avance de la herramienta. Cuando se aumenta el avance se produce un rompimiento del material en muy pequeños trozos que se comienzan a mover sobre la cara de contacto de la herramienta. Este proceso continúa mientras avanza la herramienta (Fig. 2.31).

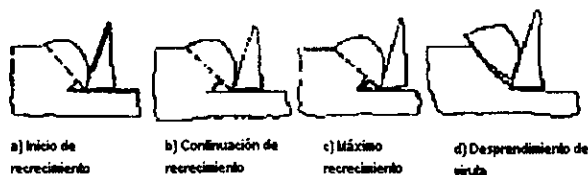


Figura 2.31 Formación de viruta discontinua.

La formación de viruta discontinua difiere de la continua en que durante la deformación, el material de trabajo se desliza sobre la cara de contacto de la herramienta en una longitud menor y por lo tanto durante un tiempo menor. Debido a esto la mayoría del calor producido es absorbido por la viruta por lo que la herramienta se mantiene a una temperatura menor y en consecuencia se obtiene una vida mayor de la herramienta.

En materiales menos frágiles que pueden sufrir alguna deformación plástica se pueden obtener tanto viruta continua como discontinua bajo condiciones adecuadas de velocidad de corte y ángulo de incidencia.

Los tres tipos anteriores de viruta son los más comúnmente obtenidos en la práctica, pero se pueden obtener combinaciones con algunos tipos especiales de materiales y aleaciones. Por ejemplo en el titanio y sus aleaciones, el esfuerzo de cedencia disminuye conforme aumenta la temperatura, por lo que se puede obtener viruta continua pero con propiedades no homogéneas ya que puede haber virutas con zonas combinadas de alta y muy baja deformación.

2.4.2 El corte ortogonal.

Durante el corte, el material cerca del filo de la herramienta sufre deformación plástica y después del deslizamiento en la cara de contacto comienza a formar la viruta. La zona de deformación plástica se localiza entre la viruta (donde la viruta comienza a moverse como un cuerpo rígido) y el material sin deformación o con deformación elástica solamente. El tamaño de la zona de deformación varía de acuerdo a las condiciones de corte. A relativamente bajas velocidades de corte, la zona es de tamaño considerable para fines del análisis, pero al aumentar la velocidad de corte se reduce en tamaño hasta aproximarse a un plano de desprendimiento de espesor despreciable. Actualmente no existe un análisis que tome en cuenta tales variaciones en la zona de deformación, pero si existen análisis que suponen la existencia de una zona de pared gruesa o al análisis suponiendo la zona plana. De acuerdo a esto, las soluciones son conocidas como modelos de zona con espesor y modelos de zona plana. En este último modelo se asume que el material se desprende en un plano para formar viruta. El plano es llamado el plano de desprendimiento (shear plane) y al ángulo que se forma con el ángulo de velocidad de corte es llamado el ángulo del plano de desprendimiento (shear plane angle) tal como se muestra en la figura 2.32 [D].

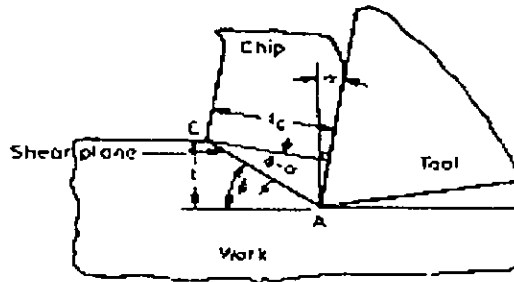


Figura 2.32 Plano de desprendimiento (AC) y el ángulo del plano de desprendimiento (ϕ).

2.4.2.1 Determinación del ángulo del plano de desprendimiento.

El ángulo del plano de desprendimiento es el ángulo entre el vector de velocidad de corte y el plano en el cual el material de trabajo sufre la deformación de desprendimiento para formar la viruta. En la figura anterior este ángulo se muestra como el ángulo ϕ . El material fluye continuamente desde el material de trabajo hasta formar la viruta y como aunque exista cierta deformación podemos considerar despreciables los cambios de volumen, por tanto, podemos escribir una ecuación de continuidad:

$$tbV = t_c b_c V_c \quad (2.1)$$

donde t , b y V respectivamente representan la profundidad de corte, ancho de corte y velocidad en el material de trabajo; por tanto t_c , b_c y V_c representan el espesor, ancho y velocidad de la viruta.

Cuando b es comparable con t , hay importante flujo hacia los lados (deformación en la dirección del ancho b) y b_c es mayor que b . De otra forma, si $b \gg t$, el flujo hacia los lados es despreciable y podemos tomar $b = b_c$. En la mayoría de los procesos de corte esta condición se satisface. Por lo tanto:

$$tV = t_c V_c \quad (2.2)$$

De igual forma:

$$r_t = \frac{t}{t_c} = \frac{V_c}{V} = \frac{L_c}{L} \quad (2.3)$$

donde r_t es el espesor de la viruta y L_c la longitud de la viruta formada de una capa de material sin cortar de longitud L en la superficie de trabajo. De la geometría es claro que:

$$\text{Longitud del plano de desprendimiento} = AC = \frac{t}{\sin\phi} = \frac{t_c}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.4)$$

donde α es el ángulo de incidencia de la herramienta
Entonces:

$$\frac{t}{t_c} = r_i = \frac{\text{sen } \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (2.5)$$

Esta ecuación puede ser resuelta para ϕ como:

$$\tan\phi = \frac{r_i \cos\phi}{1 - r_i \text{sen } \alpha} \quad (2.6)$$

Con la ayuda de la ecuación anterior el ángulo ϕ puede ser determinado experimentalmente. Todo lo que se necesita saber es el ángulo de incidencia α de la herramienta y el espesor de la viruta r_i que puede ser determinado midiendo L y L_c .

2.4.2.2 Componentes de la fuerza de corte en el corte ortogonal.

Las diferentes componentes de la fuerza de corte resultante R se muestra en la figura 2.33. Se muestra que R puede ser descompuesta en dos componentes ortogonales (la componente en la dirección del ancho b es cero). De acuerdo a las direcciones seleccionadas, las componentes pueden ser:

- 1) F_h = componente de la fuerza paralela al vector de velocidad de corte.
 F_v = componente de la fuerza normal a F_h .
- 2) F_s = componente de la fuerza paralela al plano de desprendimiento.
 F_p = componente de la fuerza normal a F_s .
- 3) F_t = componente de la fuerza paralela a la cara de contacto (arranque).
 F_n = componente de la fuerza normal a F_t .

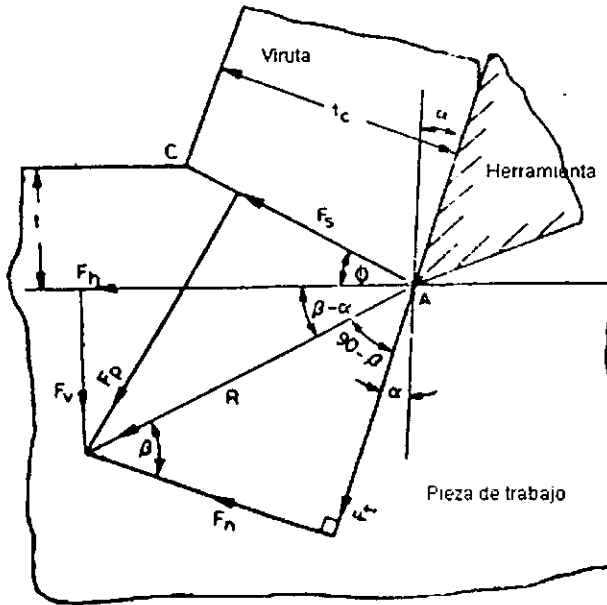


Figura 2.33 Componentes de la fuerza en el corte ortogonal.

Podemos determinar R si conocemos cualquier par de las componentes listadas o cualquier componente y su relación angular con R .

Experimentalmente, F_s y F_v normalmente pueden ser medidos con la ayuda de dinamómetros.

En la relación geométrica entre las diferentes componentes de la fuerza resultante R que se muestran en la figura intervienen el ángulo del plano de desprendimiento ϕ , el ángulo de fricción β y el ángulo de incidencia α . Con esto podemos obtener la resultante de R según:

$$R = (F_h^2 + F_v^2)^{1/2} \quad (2.7)$$

$$R = (F_s^2 + F_p^2)^{1/2} \quad (2.8)$$

$$R = (F_t^2 + F_n^2)^{1/2} \quad (2.9)$$

Si μ es el coeficiente de fricción promedio en la interfase viruta-herramienta, entonces F_t , F_n y β serán despejados como sigue:

$$\mu = \tan\beta = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.10)$$

También, de la figura 2.33

$$\tan(\beta - \alpha) = \frac{F_v}{F_h} \quad (2.11)$$

Por tanto, de las dos ecuaciones anteriores podemos determinar el ángulo de fricción.

2.4.3 Modelos de zona plana.

Como ya se mencionó, estos modelos consideran que el material se separa de la pieza de trabajo en el plano de desprendimiento (shear plane) a un ángulo llamado el ángulo del plano de desprendimiento (shear plane angle).

2.4.3.1 Modelo de Merchant.

Una de las investigaciones más aceptadas para el corte ortogonal y sobre el que se basará nuestro trabajo es el modelo planteado por Ernst y Merchant (1941). Este modelo está basado en la minimización de la energía disipada durante el proceso de corte. Las suposiciones básicas de este modelo son:

- 1) La punta de la herramienta esta perfectamente afilada.
- 2) El material de trabajo sufre deformación sólo sobre el plano de desprendimiento.
- 3) No existe ensanchamiento (la deformación es bi-dimensional).
- 4) Existe distribución uniforme de los esfuerzos normal y cortante en el plano de desprendimiento.
- 5) El material de trabajo es rígido y perfectamente plástico [D].

De las relaciones geométricas entre las fuerzas del corte ortogonal, podemos escribir:

$$\begin{aligned} F_h &= R \cos(\beta - \alpha) \\ F_v &= R \cos(\phi + \beta - \alpha) \end{aligned} \quad (2.12)$$

donde $F_v = (AC)b \cdot K = \frac{t \cdot b \cdot K}{\sin \phi}$ (K es el esfuerzo de cedencia a esfuerzo cortante)

Por lo tanto se tiene:

$$\begin{aligned} R &= \frac{t \cdot b \cdot K}{\sin \phi \cos(\phi + \beta - \alpha)} \\ R &= \frac{t \cdot b \cdot K \cos(\beta - \alpha)}{\sin \phi \cos(\phi - \beta - \alpha)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Como en este modelo se asume que se utiliza la mínima energía; esta será igual solo a $F_h \times V$. Como se ha considerado que α y β no son funciones de V , podemos aceptar que la minimización de F_h es la misma que la minimización de $F_h \times V$. Por tanto, para un valor óptimo de ϕ , dejamos que:

$$\frac{dF_h}{d\phi} = 0 \tag{2.14}$$

$$\frac{tb \cos(\phi - \alpha) [\cos \phi \cos(\phi + \beta - \alpha) - \text{sen } \phi \text{sen}(\phi + \beta - \alpha)]}{\text{sen}^2(\phi) \cos^2(\phi + \beta - \alpha)} = 0$$

donde:

$$\phi \neq 0 \text{ y } (\phi + \beta - \alpha) \neq 0. \tag{2.15}$$

2.4.3.2 Modelo de Oxley.

Además del modelo de Merchant, existen modelos que toman consideraciones que complican la comprobación experimental.

Oxley aplica un modelo simplificado de campo de líneas de deslizamiento convirtiéndolo en un modelo de zona plana (Fig. 2.34).

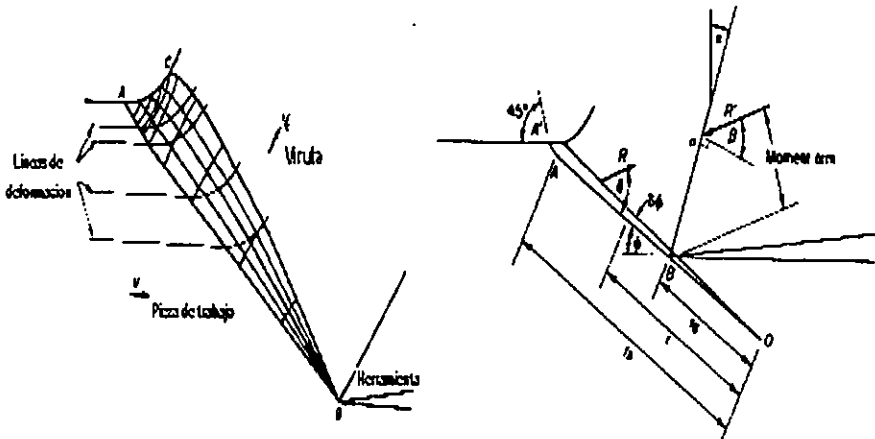


Figura 2.34 Modelo de Oxley de zona plana.

En su análisis Oxley supone lo siguiente:

- 1) No se ejerce fuerza alguna en la punta de la herramienta.
- 2) Los esfuerzo normal y tangencial en la cara de contacto de la herramienta son uniformemente distribuidos en la región de contacto herramienta-viruta.

- 3) El punto A esta a una distancia despreciable de la superficie libre y la línea de deslizamiento AB se curva desde A hasta encontrarse con la superficie libre horizontal a los 45° [E].

En la superficie libre cerca del punto A, el esfuerzo cortante es k y el esfuerzo normal de la superficie libre original es cero. Por tanto el esfuerzo hidrostático es igual a k .

El esfuerzo hidrostático en A (P_A) puede ser encontrado despreciando el término por endurecimiento del material, debido a que A está muy cerca de la superficie libre

$$P_A = k \left[1 + 2 \left(\frac{\pi}{4} - \phi \right) \right] \quad (2.16)$$

Considerando constante el esfuerzo a lo largo de una línea recta sobre AB

$$P_B = P_A - \frac{\Delta k}{\Delta S_1} \cdot \frac{t}{\sin \phi} \quad (2.17)$$

La distribución del esfuerzo hidrostático en AB es lineal con $P_b < P_a$. La fuerza resultante de AB esta dada por

$$\tan \theta = \frac{P_A + P_B}{2k} \quad (2.18)$$

de donde despejando y considerando la geometría:

$$P_B = k \left[\frac{\cos 2(\phi - \alpha)}{\tan \beta} - \sin 2(\phi - \alpha) \right] \quad (2.19)$$

donde β es el ángulo de fricción en la cara de contacto despejando:

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} - \phi + \frac{\cos 2(\phi - \alpha)}{2 \tan \beta} - \frac{\sin 2(\phi - \alpha)}{2} \right] \quad (2.20)$$

Para conservar el equilibrio de la viruta, la fuerza R y R' (Fig.2.34) serán iguales y opuestas. El ángulo entre R y la dirección de corte es $(\beta - \alpha)$. Entonces:

$$\theta = \phi + \beta - \alpha \quad (2.21)$$

Las ecuaciones 2.20y 2.21 pueden ser resueltas para obtener el ángulo de desprendimiento para cualquier ángulo de incidencia y coeficiente de fricción.

2.4.3.3 Procesos de corte con profundidad de corte no constante.

En muchos procesos de maquinado el espesor de la viruta varía durante el corte. Ejemplos de estos procesos son el fresado, rectificado, el corte de engranes, etc. En estos procesos, durante la acción de un diente de corte en particular, el espesor de corte varía desde cero hasta un máximo o de un máximo a cero. Otros casos en los que el espesor de la

viruta es variable, cuando existe vibración o baleros dañados. Los casos de inclinación de la pieza puede ser hacia arriba (positiva) o hacia abajo (negativa) (Fig. 2.35).

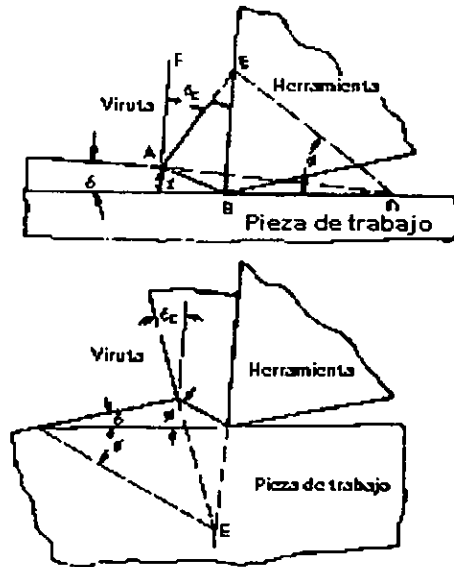


Figura 2.35 Dos casos con espesor de viruta variable.

Existen diversos intentos para encontrar el ángulo de desprendimiento ϕ para corte con espesor de viruta variable. El ángulo instantáneo de desprendimiento ϕ está dado por:

$$\phi = \phi_0 + C\delta \quad (2.22)$$

donde δ es la inclinación de la superficie en contacto con el filo de la herramienta, y ϕ_0 es el ángulo del plano de desprendimiento cuando la inclinación de la superficie de trabajo es cero. El valor sugerido para el coeficiente C es diferente dependiendo del autor, algunos de ellos son:

Merchant	C= 0.50
Shaw y Shanghani	C= 1.00
Wallace y Andrew	C= 0.75
Oxley	C= 0.20
Kobayashi y Shabaik	C= 1.00

Como existe una gran variación en el valor de C según los diferentes autores, se considera que C no es constante en ningún caso y depende de las condiciones del corte. Investigadores como Kaith y Gupta en sus trabajos han encontrado que C depende del ángulo de incidencia α , la inclinación de la superficie δ y el ángulo de desprendimiento

en estado permanente ϕ_0 . Por lo tanto es claro que expresar el ángulo ϕ en términos de ϕ_0 y δ no es el mejor camino.

Finalmente, para muchos propósitos de análisis, la suposición de que $C=1$ es generalmente aceptada.

2.4.4 El Corte oblicuo.

Muchos procesos de maquinado son de hecho ejemplos de corte oblicuo, ya que el corte ortogonal es solo un caso particular del corte oblicuo. Se sabe perfectamente que obtener ángulos de incidencia y condiciones óptimas para un proceso de maquinado real utilizando el modelo ortogonal no es muy confiable, a menos que se apoye en la experimentación. Pero aún con las limitantes del modelo de corte ortogonal, debido a la gran dificultad que representa el análisis del corte oblicuo solo existen muy pocos trabajos al respecto; por ello se dará solo una pequeña introducción en este tema.

2.4.4.1 Los ángulos de incidencia en el corte oblicuo.

Los ángulos básicos en el corte oblicuo dependen de lo siguiente:

- 1) El ángulo de incidencia situado en la cara de incidencia de la herramienta.
- 2) El ángulo de oblicuidad.

Un cambio en cualquiera de estos ángulos cambiará las condiciones del proceso incluyendo las fuerzas de corte.

En el corte oblicuo, el flujo de la viruta en la cara de incidencia no es normal al filo de corte, sino más bien con cierta inclinación. La inclinación se da normal al lugar donde la viruta experimenta menor resistencia o con un ángulo mayor al ángulo de la cara de incidencia. Sin embargo, en el corte oblicuo el ángulo de incidencia puede ser medido en más de un plano y por ello existe más de un ángulo de incidencia [D]. Estos se nombran como sigue:

- 1) Angulo de incidencia normal α_n .
- 2) Angulo de incidencia de velocidad α_v .
- 3) Angulo de incidencia efectivo α_e .

Los diferentes ángulos de incidencia son mostrados en la figura 2.36 y se definen como:

Angulo de incidencia normal (también llamado ángulo primario de incidencia) α_n : Es el ángulo entre la cara de incidencia y una línea perpendicular al vector de velocidad de corte en un plano normal al filo de la herramienta (vista DD).

Angulo de incidencia de velocidad α_v : Es el ángulo entre la cara de contacto (rake) y una línea perpendicular al vector de velocidad de corte en un plano paralelo a la velocidad de corte y normal a la superficie maquinada (sección BB).

Angulo de incidencia efectivo α_e : Es el ángulo entre la cara de contacto y una línea normal a la velocidad de corte medida en un plano que contiene el vector de velocidad de corte y el vector de flujo de viruta (sección AA).

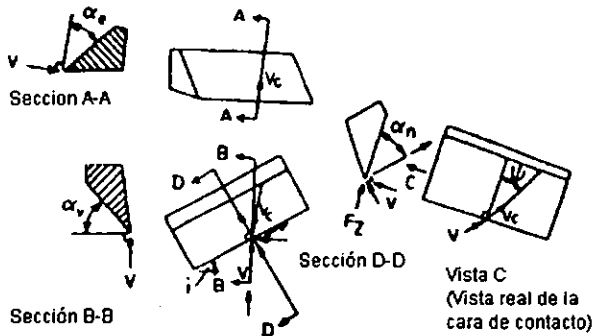


Figura 2.36 Angulos de incidencia en el corte oblicuo.

Se observa en la figura 2.36 la relación entre el ángulo de incidencia normal y el ángulo de incidencia de velocidad. En esta figura, AF es la dirección del flujo de viruta en la cara de contacto (rake face) de la herramienta. AD es normal al vector de velocidad de corte y al plano AFD el cual pasa a través de la dirección del flujo de viruta. Como el ángulo $FAD = \alpha_v$. El ángulo BAF en la cara de contacto es igual al ángulo de flujo de viruta ψ . El plano ABC es normal a la superficie maquinada y contiene al vector de velocidad de corte. DC es paralelo a BE y la línea BG es normal a la cara de contacto. Además el ángulo $CBG = i = \alpha$ al ángulo de oblicuidad (o el ángulo de inclinación). La línea BE es normal a FD. Los puntos B, C, G, D, E y F están dentro de un solo plano paralelo a la superficie maquinada. De la figura 3.38 donde se muestran los resultados experimentales obtenidos por Brown y Armarego del ángulo de flujo de viruta contra el ángulo de oblicuidad:

$$\tan \alpha_v = \frac{DB}{AD} = \frac{DC}{AD \cos i} = \frac{\tan \alpha_n}{\cos i} \quad (2.23)$$

Para el ángulo de incidencia efectivo tenemos la relación geométrica como se muestra en la figura 2.37

$$\operatorname{sen} \alpha_c = \frac{DF}{AF} \quad (2.24)$$

ahora:

$$DF = EF + DE \quad (2.25)$$

Por tanto:

$$\begin{aligned} \operatorname{sen} \alpha_c &= \frac{EF}{BF} \times \frac{BF}{AF} + \frac{CB}{BG} \times \frac{BG}{AB} \times \frac{AB}{AF} \\ &= \operatorname{sen} l \operatorname{sen} \psi + \cos l \operatorname{sen} \alpha_n \cos \psi \end{aligned} \quad (2.26)$$

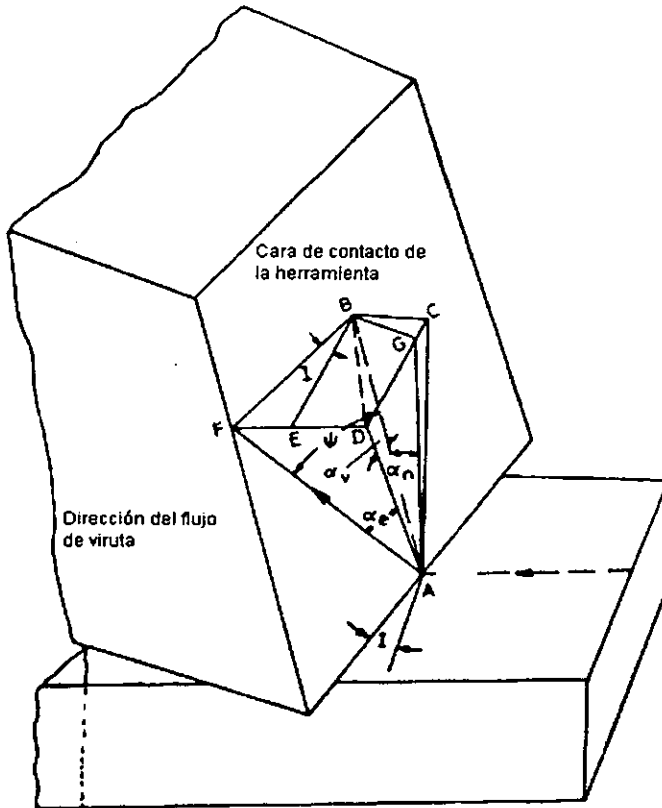


Figura 2.37 Relación entre α_c y α_n .

2.4.4.2 Relaciones para la velocidad en el corte oblicuo.

Es un hecho que tanto en el corte ortogonal como en el oblicuo, el material comienza a deformarse muy cerca del filo de la herramienta y algunas partes continúan deformándose aún sobre la cara de desprendimiento (rake face) o deformación secundaria lo que implicaría un análisis de zona con espesor. Pero como lo hemos hecho hasta ahora, si tomamos un modelo simplificado donde el desprendimiento del material de trabajo ocurre en una zona de espesor despreciable o plano de desprendimiento, para después comenzar a formar la viruta, el análisis de velocidades se vuelve muy simple. Entonces existen tres velocidades [D].

- 1) La velocidad inicial V .
- 2) La velocidad de la viruta V_c .
- 3) La velocidad de desprendimiento en el plano de desprendimiento V_s .

Ahora:

$$V_c = V + V_s \quad (2.27)$$

Por consiguiente V , V_s y V_c pueden encontrarse todos en un plano, el cual es el mismo plano donde se mide el ángulo de incidencia efectivo.

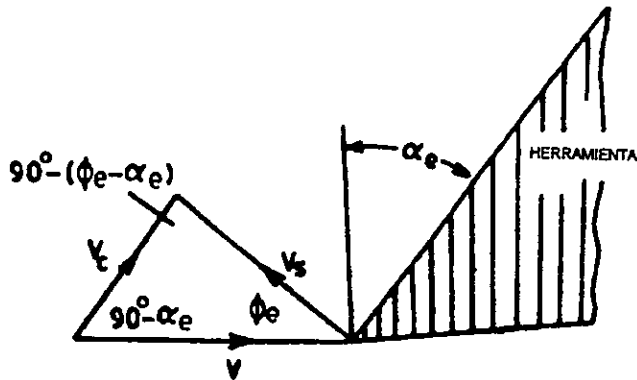


Figura 2.38 Ángulo de desprendimiento en el corte oblicuo.

De la geometría de la figura 2.38:

$$\frac{|V_c|}{|V|} = \frac{\text{sen } \phi_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \quad (2.28)$$

$$\frac{|V_s|}{|V|} = \frac{\cos \alpha_e}{\cos(\phi_e - \alpha_e)} \quad (2.29)$$

Estas ecuaciones pueden ser expresadas de una forma más conveniente descomponiendo las ecuaciones anteriores en direcciones (1) normal al filo de corte (2) paralelo al filo de corte (3) normal a la superficie maquinada. Los resultados se pueden expresar como sigue:

$$\frac{|V_c|}{|V|} = \frac{\text{sen } \phi_n \text{ cos } i}{\text{cos}(\phi_n - \alpha_n) \text{ cos } \psi} \quad (2.30)$$

$$\frac{|V_s|}{|V|} = \frac{\text{cos } i \text{ cos } \alpha_n}{\text{cos } \psi \text{ cos}(\phi_n - \alpha_n)} \quad (2.31)$$

2.5 PARAMETROS DE CORTE.

Es de suma importancia en un proceso de corte, determinar los parámetros de corte óptimos. En la manufactura CNC, no es muy útil y algunas veces es imposible determinar algunos parámetros, sobre todo los que implican el tiempo que duran ciertos movimientos de la herramienta; como son: tiempos de movimiento en vacío, tiempos exactos de cambio de herramienta “de viruta a viruta” o tiempos de entrada y salida durante un barrenado profundo. Esto debido a que la mayoría de los controles calculan automáticamente muchas trayectorias y cambios de velocidad en los ejes de movimiento. Esto se dificulta aún más cuando el programa es generado por un sistema CAD/CAM, donde dependiendo de la forma de procesar la información, en el programa se asignarán una gran cantidad de cambios de velocidad, avances, trayectorias, etc. La gran ventaja de los controles actuales, es que muchos poseen opciones para determinar el tiempo que ha tardado determinada corrida de un programa, el tiempo total de maquinado de un lote de piezas y algunas opciones de cálculos estadísticos. En general, los parámetros a calcular para elaborar un programa, que se consideran de mayor importancia y que con valores adecuados aseguran la viabilidad del proceso de corte son los siguientes:

- a) La velocidad de giro o velocidad angular (N).
- b) La velocidad de corte o superficial (SFM).
- c) Avance por diente (fz).
- d) Avance (F).
- e) Profundidad de corte (t).
- f) Número de dientes (álabes) de corte (Z).
- g) Ancho de corte (W).
- h) Taza de remoción de material (Q).
- i) Potencia Requerida (P).

El valor que tomen estos parámetros para un proceso determinado depende de muchos factores a considerar; aunque en general los más importantes pueden ser los siguientes:

- El tipo y dimensiones del material a maquinarse.
- El tipo de máquina-herramienta disponible.
- El proceso de corte a realizar.
- El tipo y material de la herramienta de corte utilizada.

Una vez que se han calculado u obtenido de planos, especificaciones y tablas pertinentes dichos parámetros, es posible comenzar a programar y realizar las primeras pruebas de corte, ya que un cálculo teórico no asegura la optimización del proceso. Solo después de efectuar las pruebas y de realizar las modificaciones pertinentes tomando en consideración factores externos como el uso de refrigerantes, el tipo de sujeción, el estado de la máquina-herramienta, etc., además de la experiencia previa en este tipo de procesos, se pueden llegar a los parámetros adecuados para el proceso en cuestión.

2.5.1 Maquinabilidad.

Como una referencia en lo que se refiere al material, la maquinabilidad es una característica muy útil para conocer un rango inicial para determinar la velocidad de corte a utilizar. El término maquinabilidad se refiere a la medida de que tan fácil un material puede ser maquinado cuando se compara con el acero de clasificación AISI B1112 con una dureza de 160 Bhn. En la comparación se considera lo siguiente:

- a) El Instituto Americano del Hierro y el Acero realizó pruebas con este material a una velocidad de corte de 180 pie/min y comparó sus resultados para el B1112 contra otros materiales.
- b) Si el B1112 representa el 100% de maquinabilidad, entonces los materiales con un rango menor de este nivel se definen como más difíciles de maquinarse; mientras que los que exceden el 100%, serán más fáciles de maquinarse.

El valor porcentual de maquinabilidad de un metal toma en consideración la velocidad de corte, el acabado superficial y la vida de la herramienta. Estos factores son analizados y combinados para lograr finalmente el valor de su maquinabilidad (Tabla 2.1).

MATERIAL	DUREZA Bhn	MAQUINABILIDAD (%)
6061-T ALUMINIO	---	190
7075-T ALUMINIO	---	120
B1112 ACERO	160	100
416 ACERO INOXIDABLE	200	90
1120 ACERO	160	80
4140 ACERO (revenido)	187	70
1020 ACERO	148	65
8620 ACERO	194	60
304 ACERO INOXIDABLE	160	40
17-4 PH ACERO INOXIDABLE	388	28
INCONEL X	360	15
RENE 41	215	15
WASPALLOY	270	12
A-286	300	10
HASTELLOY X	197	9

Tabla 2.1 Maquinabilidad de algunos materiales

Como ya se mencionó, la maquinabilidad también nos da información para poder calcular una velocidad de corte inicial con un material del cual conozcamos sus características y podamos de esta forma tener un parámetro de que velocidad de corte es posible aplicar según cierta clasificación (Tabla 2.2).

GRUPOS	A	B	C
Materiales	Fundición de hierro gris, aleados de alta temperatura, aleados de Níquel	Aceros inoxidable, serie 300, serie 400, aceros de herramienta, Cobre al Berilio	Aluminio y Cobre
Velocidades de corte referencia para desbaste	400	600	800
Velocidad de corte referencia para acabado	500	750	1000

Tabla 2.2 Categorías de materiales según su maquinabilidad.

Es posible calcular una velocidad inicial de corte con el siguiente procedimiento:

- Simplemente conociendo el tipo de material (supongamos Acero 4140 revenido), buscar el valor de su maquinabilidad de la tabla 2.1 (70% en este caso).
- Encontrando el valor de velocidad referencia para desbaste o acabado según sea el caso de la Tabla 2.2 (600 SFM para desbaste).

- c) Multiplicarlos para obtener la velocidad superficial (600 x 0.7) lo cual será un valor inicial a modificar (420 SFM) para maquinarse con herramientas de Carburo de Tungsteno.

Si se desea realizar el cálculo teórico de corte y obtener así un valor más confiable de los parámetros, se debe recurrir a información técnica proporcionada por el fabricante tanto de herramientas, maquinaria y materiales, donde se obtienen algunos de los parámetros, para posteriormente poder calcular los valores de los parámetros restantes.

2.5.2 Velocidad angular.

La velocidad angular (N) generalmente se expresa en revoluciones / minuto (rpm). Su valor generalmente es limitado por el rango de revoluciones / minuto a los que puede girar el husillo principal de la máquina. Para operaciones de fresado, se considera como el husillo principal al husillo portaherramienta, mientras que en torneado se considera el mandril (chuck) que sujeta la pieza de trabajo.

2.5.3 Velocidad de corte o superficial.

La velocidad de corte o superficial (SFM) es simplemente la velocidad tangencial en la superficie de trabajo a un determinado valor de rpm. Para calcular esta velocidad tangencial en fresado se utilizará el diámetro de la herramienta, mientras que para torneado el diámetro original de la pieza de trabajo. Debido a que comúnmente se utiliza indistintamente valores de pies/min. ó metros/min., se debe tener cuidado con la congruencia dimensional. En el sistema inglés se utiliza la siguiente fórmula:

$$SFM = \pi D N / 12 \quad (2.32)$$

donde: D= diam. de cortador o de pieza en pulgadas.

N= revoluciones / minuto.

SFM= Velocidad de corte en pies / min.

2.5.4 Avance por diente.

El avance por diente (fz) en un proceso de fresado se define como el avance lineal de un diente o álabe de corte mientras el husillo gira una revolución. Se expresa en mm/diente ó pulg/diente.

Para obtener un valor a utilizar en cálculos, se corrige el avance por diente multiplicando por el número total de dientes de corte (Z). El caso de que se tengan más de un filo de corte es usual en los procesos de fresado, por lo tanto se obtiene:

$$(fz) (Z) = f \quad (2.33)$$

donde: f es expresado en pulgadas o milímetros.

Los valores adecuados de f_z y de SFM los proporcionan los fabricantes de herramientas en tablas y varían de acuerdo al tipo de operación, máquina utilizada, características de la herramienta y material de trabajo.

2.5.5 Avance.

El avance (F) se define en fresado como la velocidad con que la herramienta avanza cortando dentro del material mientras el husillo gira una revolución. En torneado generalmente se considera solamente como el movimiento de la herramienta cortando material en dirección paralela al eje de giro de la pieza. En fresado es posible calcularlo según:

$$F = f_z Z N \quad (2.34)$$

donde: F se expresa en pulg/min.
f_z en pulg/diente.
Z es el número total de dientes.
N se expresa en revoluciones/min.

2.5.6 Profundidad de corte.

La profundidad de corte (t) como su nombre lo indica, es simplemente la distancia lineal que penetra la herramienta en el material desde la superficie. Se utiliza tanto en fresado como en torneado y se expresa en pulgadas o milímetros.

2.5.7 Ancho de corte.

El ancho de corte (W) se utiliza en fresado para especificar cual es el espesor de material a cortar en una sola pasada. Por ejemplo, si se realiza una ranura completa con un cortador de ½ pulg de diámetro, el ancho de corte tendrá el mismo valor. En otro caso, se puede planear una pieza con una herramienta de 3 pulg de diámetro programando un sobrepaso del 50%, donde el ancho de corte sería de 1 ½ pulg. En torneado solo se utiliza este parámetro en el proceso de tronzado o ranurado, donde el ancho de corte será el ancho de la cuchilla de tronzar.

2.5.8 Tasa de remoción.

La tasa de remoción de material (Q) se define como el volumen de material arrancado durante un minuto de trabajo a una velocidad angular fija. En sistema inglés se expresa en pulg³/min. y se puede calcular según:

$$Q = W t F \quad (2.35)$$

donde: Q se expresa en pulg³/min.
W se expresa en pulg.
t se expresa en pulg.
F se expresa en pulg/min.

2.5.9 Potencia requerida.

La potencia requerida es la potencia que debe poder suministrar la máquina-herramienta para poder realizar el corte en cuestión. La potencia requerida es proporcional a la tasa de material removido y varían substancialmente con el tipo de material de trabajo. Es posible realizar un cálculo teórico de la potencia requerida, pero esto implica determinar las componentes de las fuerzas de corte que intervienen en el proceso, las cuales en la mayoría de veces es imposible determinar en el piso o taller de máquinas. Por lo tanto, para un cálculo básico, diversos fabricantes han creado tablas con base en pruebas de corte, con las que es posible obtener la potencia de una forma más sencilla (Tabla 2.3).

Material	Dureza Bhn	UHP
Aluminio	-----	0.25
Latón	-----	0.25
Cobre	-----	0.30
Fundición-gris	200	0.33
Hierro nodular	225	0.54
Iconel 700	330	1.1
1020	165	0.58
1050	225	0.80
4140	275	0.70
Hierro fundido	225	0.62
Acero inoxidable	225	0.73

Tabla 2.3 Tabla de valores de dureza Bhn y potencia unitaria requerida por algunos materiales.

Para calcular una primera aproximación de la potencia requerida se puede utilizar:

$$P = UHP Q \eta \tag{2.36}$$

donde: P es la potencia requerida en HP.

UHP es la potencia unitaria obtenida de la tabla 2.3

Q es la Tasa de remoción de material en pulg³/min.

η es la eficiencia de la máquina-herramienta

El valor que toma η no puede exceder la unidad y depende de las condiciones en que se encuentra la máquina-herramienta y otros factores que modifican los parámetros de corte; siendo aceptable para condiciones adecuadas de operación y un buen estado de la máquina, un valor del 0.7 al 0.80.

2.6 FACTORES QUE MODIFICAN LOS PARAMETROS DE CORTE.

Existen factores externos a los parámetros de corte, material de trabajo y a la naturaleza del proceso de corte, que pueden afectar enormemente los resultados que se esperarían obtener en determinadas condiciones de trabajo. A pesar de calcular

adecuadamente los parámetros de corte es de suma importancia considerar factores como si se utilizará o no un fluido de corte y de que tipo, el método de fijación de la pieza de trabajo y si la máquina a utilizar cuenta con la rigidez necesaria para soportar las fuerzas de corte requeridas para el proceso. En muchas ocasiones, el no considerar o minimizar la importancia de estos factores puede reflejarse en acabados deficientes por una vibración excesiva, mal aprovechamiento de la potencia suministrada por la máquina por una utilización inadecuada de fluidos de corte, o un accidente grave por una inadecuada sujeción de la pieza de trabajo que no es capaz de soportar las fuerzas de corte.

2.6.1 Fluidos de corte.

Los fluidos de corte o refrigerantes son generalmente utilizados en operaciones con maquinaria CNC. Durante la acción de arranque de viruta por la acción de la herramienta en el material, se genera calor debido a la deformación plástica del material que a su vez se desliza con cierta fricción sobre la herramienta por lo que el material tiende a fundirse sobre ella. Conforme aumenta la temperatura el recrecimiento en la herramienta es mayor, provocando su fractura. Como ya se ha mencionado el recrecimiento también disminuye la calidad de la superficie en el material. Para evitar esto, se emplean los fluidos de corte, los cuales ofrecen los siguientes beneficios:

- Enfriamiento y lubricación de la herramienta y el material de trabajo.
- Controlan el recrecimiento y desgaste de la herramienta.
- Ayuda a desalojar la viruta.
- Ayudan a obtener un buen acabado superficial.
- Ayudan a la herramienta a soportar mayores velocidades y profundidades de corte.

Los fluidos de corte se pueden clasificar como sigue:

- 1) Emulsiones.
- 2) Aceites.
- 3) Soluciones.

2.6.1.1 Emulsiones.

Las emulsiones consisten en un aceite soluble emulsificado con agua en la relación de 1 parte de aceite a 10 hasta 100 partes de agua, según sean el tipo de producto y la operación. Las emulsiones tienen aditivos de actividad superficial o para extrema presión con el fin de reducir la fricción y suministrar una película eficaz de lubricante bajo alta presión en la interfase herramienta-viruta, durante el maquinado. Las emulsiones son fluidos de corte de bajo precio y se emplean en casi todos los tipos de corte y rectificado en todos los tipos de material. Las mezclas más concentradas de aceite y agua, por ejemplo 1:10, se emplean para brochar, roscar y cortar engranes. Para la mayor parte de las operaciones, una mezcla de 1:20 es adecuada para el trabajo con tornos de torreta, algo de trabajo con máquinas para tornillos, fresado de engranes, fresado en general y taladrado.

2.6.1.2 Aceites.

Para el corte de metales se utiliza una gran variedad de aceites. Se emplean cuando es esencial la lubricación más que el enfriamiento o para cortes de acabado de alta calidad, aunque a veces se logran acabados mejores con las emulsiones. Los aceites que se suelen emplear en el maquinado son minerales con las composiciones como aceite mineral simple, con sebo, con sebo y azufre, con sebo y cloro y con sebo, azufre y cloro. La composición del aceite variará según la aplicación. Por ejemplo, para evitar que se manchen metales como el aluminio y el cobre, se emplean azufre y cloro inhibidos.

2.6.1.3 Soluciones.

Las soluciones son una familia de fluidos de corte en los que se mezclan agua y diversos agentes químicos como aminas, nitritos, nitratos, fósforos, cloro y compuestos de azufre. Estos agentes se agregan para evitar la herrumbre, suavizar el agua, lubricar y reducir la tensión superficial. La mayor parte de estos fluidos químicos son refrigerantes pero algunos hacen la función de lubricantes.

La ventaja principal de los fluidos a base de petróleo es su baja tensión superficial: la de los fluidos miscibles en agua es el alto calor específico del agua. La elección del fluido de corte depende de muchos factores como la velocidad, facilidad para limpieza, distorsión por el calor y susceptibilidad del material de la pieza de trabajo a la corrosión con esfuerzo. Como regla general, si la velocidad de corte es menor de 75 pie/min (23 m/min) se deben emplear aceites y para mayores de 75 a 100 pie/min (30 m/min) se recomiendan fluidos a base de agua.

Para seleccionar un fluido de corte para una operación en particular se debe tener en cuenta varios factores: el material de la pieza de trabajo, la dificultad de la operación de maquinado, la compatibilidad del fluido con el material de la pieza de trabajo y los componentes de la máquina-herramienta, la preparación de la superficie, el método de aplicación y la eliminación del fluido, la contaminación del fluido de corte con los lubricantes de la máquina y el tratamiento del fluido después de su uso.

El método más común de aplicación es el enfriamiento por inundación o "chorro", en cantidades de alrededor de 3 a 5 gal/min (10 a 20 l/min), para herramientas de una punta y hasta 60 gal/min (230 l/min) por cortador, para cortadores de dientes múltiples. Siempre que sea posible, se den emplear boquillas múltiples. En el enfriamiento por nebulización, se utiliza un equipo de chorro pequeño para dispersar los fluidos a base de agua en forma de gotas muy finas en un portador que suele ser aire, a presiones de 10 a 80 lb/pulg² (0.07 a 0.55 MPa). Este sistema tiene la ventaja de una mayor visibilidad de la zona de trabajo y conveniencia por lo reducido del equipo, pero requieren de buena ventilación.

2.6.2 Fijación.

Se entiende como sistema de fijación al medio con el cual se fija una pieza a la mesa de trabajo en una fresadora. Los sistemas de fijación para el maquinado pueden tener muy diversos principios; siendo los más comunes los siguientes:

- Fijación por acción mecánica; como prensas y bloques de fijación (clamps) de colocación, ajuste y apriete manual.
- Fijación por acción hidráulica; generalmente este sistema se utiliza en prensas, mandriles y contrapunto de tornos CNC, cuya fuerza de apriete es ajustable y de activación programable.
- Fijación por acción neumática; siendo aplicada en prensas también de activación programable.
- Fijación por acción magnética. Se utiliza más comúnmente en mesas magnéticas para operaciones de rectificado, pudiéndose utilizar mesas magnéticas permanentes o mesas electromagnéticas con fuerza de sujeción variable.

Dependiendo del proceso de maquinado, cada sistema de fijación tiene sus ventajas. En los procesos de fresado comunes, generalmente se utilizan las prensas manuales, debido a que proporcionan una buena estabilidad y rigidez si se elige el tamaño y tipo de prensa adecuada. Solo se justifica la utilización de otro sistema, como por ejemplo uno hidráulico automático, por un requerimiento de alta productividad. Además, sistemas de sujeción como los neumáticos, muchas veces tienen problemas de estabilidad y seguridad durante la operación. En torneado, generalmente se considera que lo que se fija la herramienta de corte, siendo utilizada la fijación mecánica prácticamente en cualquier caso.

2.6.3 Rigidez de la máquina-herramienta.

Durante un proceso rudo de arranque de viruta es cuando se apreciará la importancia de conocer y considerar el diseño, tipo de estructura y configuración de la máquina durante el proceso de la selección, ya que la rigidez que puede proporcionar la máquina-herramienta durante una operación de corte es uno de los factores primordiales a considerar en el diseño de la misma. Como ya se ha señalado en capítulos anteriores, dependiendo principalmente del tipo de material, diseño y volumen de la estructura principal, la máquina operará con mayor o menor vibración. En general, se considera a las máquinas con estructura de una sola pieza de fundición (casting) como las de mayor rigidez en centros de maquinado vertical de mediano tamaño. Se considera que este tipo de construcción tiene una estructura con propiedades más homogéneas, por lo que tiende a evitar las vibraciones y tener mayor estabilidad térmica, a diferencia de las máquinas con estructura de elementos individuales unidos por soldadura u otro medio.

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

Capítulo 3.

Análisis del proceso de corte en cortadores verticales.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Como ya se ha mencionado, una empresa mexicana que se dedica a la consultoría y distribución de máquinas-herramienta CNC se ha percatado que aproximadamente el 80% de los compradores potenciales de máquinas fresadoras y centros de maquinado requieren que se les especifique la capacidad óptima de la máquina para que cumpla con los requerimientos de sus procesos de corte y además cuenta con una línea de herramientas de corte que han demostrado tener excelente desempeño para el maquinado con CNC.

Desgraciadamente, como también se ha discutido, no existe una metodología para calcular teóricamente el torque y velocidad necesarios para un proceso específico de corte. Solamente se cuenta con una serie de fórmulas aproximadas que incluyen constantes experimentales, de las cuales muy pocas veces sabemos que variables han sido consideradas para su obtención, lo que en ocasiones las hace inútiles para algunas aplicaciones. Por tanto, ingenieros de manufactura o asesores deben recurrir a la experiencia o a la realización de pruebas de corte para cada uno de sus procesos para determinar si el equipo comprado satisface sus necesidades. Cabe mencionar que dichas pruebas solamente son posibles realizarlas con la máquina ya instalada en planta, con lo cual se corre el riesgo de que el cliente no cubra sus necesidades.

En esta empresa, aproximadamente el 20 % de las máquinas vendidas no han satisfecho completamente la necesidad de los clientes ya que no pueden efectuar el trabajo para el cual adquirieron una máquina CNC, ya sea por falta de potencia de la máquina, un control con capacidad limitada, etc. Esto genera enormes gastos por viajes del personal técnico para asistir al cliente, realización de pruebas de corte en planta, etc., y en casos extremos por la devolución de maquinaria directamente al fabricante.

Contar con una metodología para determinar teóricamente el torque necesario para cualquier proceso de corte, así como el rango de velocidad del husillo que debe tener una máquina-herramienta, sería una valiosa herramienta para el departamento de asesoría preventiva, ya que también para la empresa distribuidora es sumamente difícil realizar pruebas físicas debido a que generalmente no se cuenta con maquinaria en existencia. Con ello se lograría que el cliente no realice una inversión excesiva en una máquina con capacidad sobrada para sus necesidades, así como tampoco una inversión infructuosa en una máquina con una capacidad inferior a la requerida.

3.2 PROPUESTA DEL METODO DE SELECCIÓN.

Ante la necesidad de contar con un método más confiable para la selección y recomendación maquinaria CNC, el objetivo de la presente tesis es proponer un método de selección de máquinas-herramienta CNC para procesos de fresado. Una de las partes fundamentales de este método es la obtención del torque requerido utilizando un sistema de solución por el método de elemento finito y se complementa con la selección adecuada de herramientas y parámetros de corte (Capítulo 2), así como de las características y especificaciones fundamentales a considerar de la configuración y diseño de la máquina (Capítulo 1).

Todas las variables a considerar para la selección de la máquina están fuertemente relacionadas, ya que todas las condiciones que exigen estas variables deben cumplirse y complementarse en la máquina seleccionada como una condición necesaria para que logre su objetivo de efectuar el proceso de maquinado requerido.

Las variables o requerimientos del proceso de corte a considerar se relacionan de tal forma que el cambio de alguno de ellos implica un cambio en todo el proceso de selección y por lo tanto un resultado diferente de la máquina seleccionada.

También se considera la necesidad de documentar el caso analizado para comenzar a establecer "familias" de casos similares y tener una referencia e información adecuada en caso de presentarse un caso de esta misma familia. Esto con la intención de sustituir sólo las variables o requerimientos diferentes para facilitar el análisis del nuevo caso (Diagrama 3.1).

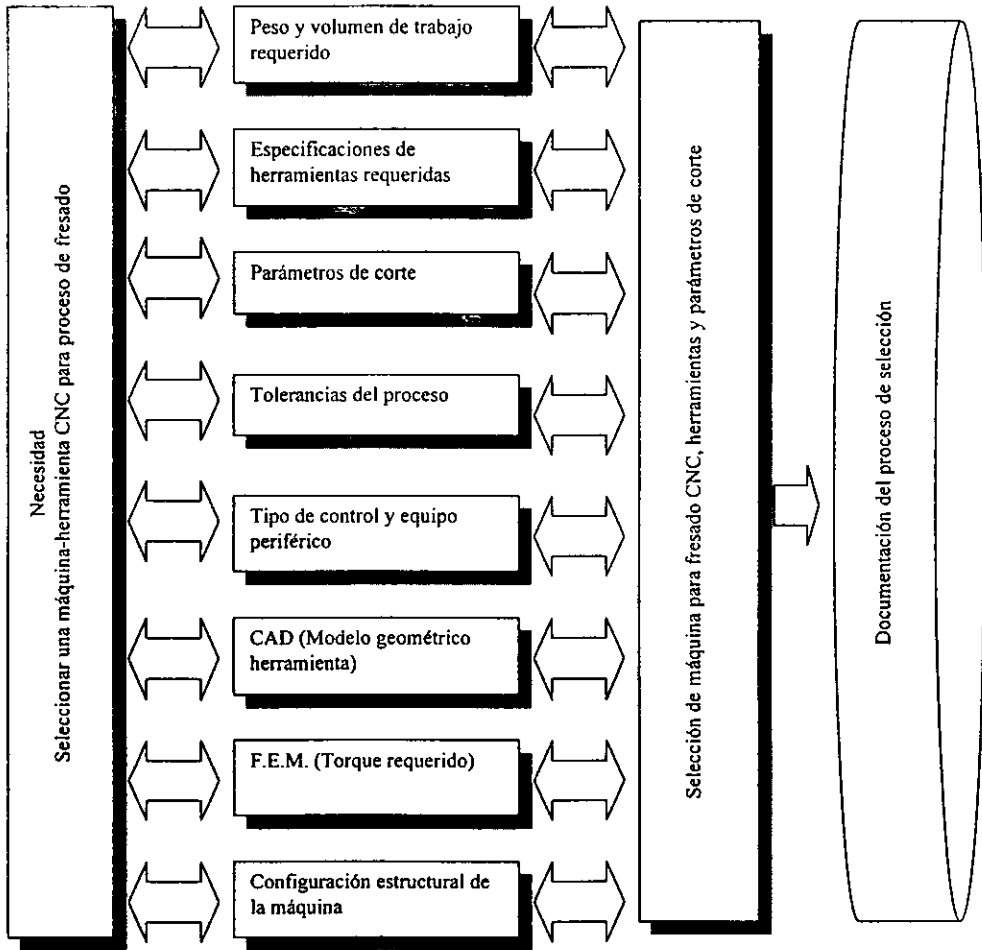


Diagrama 3.1 Propuesta de un método de selección de Máquinas-herramienta CNC para proceso de fresado utilizando el método de elemento finito.

Una vez que se han presentado en los capítulos anteriores la información esencial en lo que se refiere a máquinas-herramienta CNC y a las herramientas de corte durante el proceso de selección, ahora se plantearán los fundamentos teóricos necesarios para

desarrollar el modelo de análisis de cortadores verticales y resolverlo aplicando un sistema de solución por elemento finito y con esto obtener el torque nominal requerido en algún proceso de corte.

3.3 ESFUERZOS Y DEFORMACIONES.

Para poder determinar el torque requerido en una máquina para realizar determinado proceso de corte, es necesario entender las condiciones a las que se somete la herramienta de corte, durante el proceso de corte, ya que esta es la interfase entre la máquina y el material de trabajo. Esto implica comprender conceptos como esfuerzos, deformaciones, criterios de falla, tolerancias, etc.

3.3.1 Esfuerzo, definición.

Considerando un cuerpo en equilibrio sujeto a un sistema de fuerzas, un elemento de área ΔA localizado en una superficie interior o exterior donde actúa una fuerza ΔF , los elementos n , s_1 , s_2 constituyen un sistema ortogonal, colocando el origen de este sistema en un punto P, donde n es la normal y s_1 , s_2 son tangentes a ΔA [F]. La descomposición de ΔF en sus componentes permite definir el esfuerzo normal σ_n y el esfuerzo cortante τ_{s1} como se muestra a continuación:

$$\sigma_n = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (3.1)$$

$$\tau_{s1} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_{s1}}{\Delta A} \quad (3.2)$$

Estas expresiones determinan las componentes de los esfuerzos en el punto P para lo cual el ΔA es reducida al límite.

La descripción completa de cualquier esfuerzo requiere de la especificación sobre todos los planos que pasan a través del punto P.

3.3.2 Tensor de esfuerzos.

El esfuerzo en un punto P está definido por la determinación de los esfuerzos en un número infinito de planos que pasan a través de él, sin embargo de forma general sólo es necesario especificar las componentes de los esfuerzos sobre tres planos mutuamente perpendiculares pasando a través del punto [F]. Estos tres planos, perpendiculares entre sí, contienen tres lados de un paralelepípedo infinitesimal (Fig. 3.1).

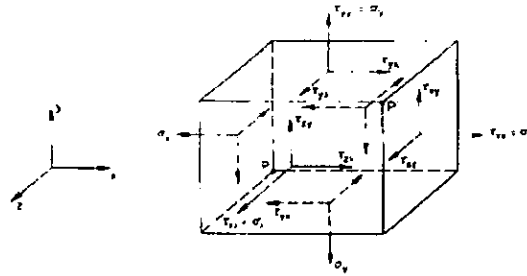


Figura 3.1 Estado tridimensional de esfuerzos.

Considerando que existe equilibrio en el cuerpo, los esfuerzos tienen que ser idénticos en los puntos P y P', y uniformemente distribuidos sobre cada cara, un total de nueve componentes escalares definen un estado de esfuerzos en un punto. Las componentes de los esfuerzos pueden ser arregladas en un tensor, donde cada renglón representa el grupo de esfuerzos actuando sobre un plano pasando a través un punto P(x,y,z) como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}$$

Este arreglo representa un tensor de segundo rango, requiere dos índices para identificar sus elementos o componentes. Un vector en un tensor de primer rango; un escalar es de rango cero.

3.3.3 Ley generalizada de Hooke.

Para los casos de cargas uniaxial, el esfuerzo es relacionado a la deformación por la ecuación:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \tag{3.3}$$

aplicable dentro del rango elástico lineal. Para una carga dirigida en el eje X:

$$\sigma_x = E\epsilon_x \tag{3.4}$$

Esta ecuación representa la Ley de Hooke.

Para un estado tridimensional de esfuerzos, cada una de las seis componentes de esfuerzos es expresada como una función lineal de seis componentes de deformación dentro del rango elástico lineal. Esta es la generalización de la Ley de Hooke para cualquier material elástico homogéneo.

$$\sigma_x = C_{11}\epsilon_{11} + C_{12}\epsilon_{22} + C_{13}\epsilon_{33} + C_{14}\gamma_{23} + C_{15}\gamma_{13} + C_{16}\gamma_{12} \quad (3.5)$$

Donde las C's son constantes elásticas que dependen del material. Se pueden asumir expresiones similares para σ_y , σ_z , τ_{xy} , τ_{yz} asimismo τ_{xz} , estas pueden ser escritas relacionando diferentes constantes. Al estar referidas a un sistema de coordenadas existe simetría entre las constantes $C_{ij}=C_{ji}$. Inicialmente, tenemos 36 constantes C_{ij} , pero existen seis constante donde $i=j$. Esto permite dejar sólo 30 constantes donde $i \neq j$, sin embargo, sólo la mitad de estas son constantes independientes de $C_{ij}=C_{ji}$. En general, para un sólido elástico linear isotrópico hay $30/2 + 6 = 21$ constantes elásticas independientes.

Como resultado de las condiciones de simetría en diferentes estructuras cristalinas el número de constantes elásticas independientes pueden ser reducidas aún más:

Estructura cristalina	Número de constantes independientes
Triclínica	21
Monoclínica	13
Ortohombica	9
Tetragonal	6
Hexagonal	5
Cúbica	3
Isotrópica	2

Por lo tanto, para un material homogéneo isotrópico, las constantes tienen que ser idénticas en todas las direcciones en cualquier punto reduciéndose sólo a 2.

3.3.4. Ecuaciones constitutivas.

Las ecuaciones constitutivas son aquellas que modelan un fenómeno físico, como los análisis de esfuerzos y deformaciones en un cuerpo, la mecánica de fluidos, transferencia de calor, etc.

Para un esfuerzo bidimensional isotrópico y homogéneo de espesor unitario, las deformaciones se expresan como sigue:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad \epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} \quad (3.6)$$

y para cortante puro:

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (3.7)$$

Donde G es el módulo de elasticidad cortante.

Para un estado tridimensional de esfuerzos en un material homogéneo isotrópico, las ecuaciones constitutivas son las siguientes:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (3.8)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (3.9)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (3.10)$$

El comportamiento de los materiales bajo un estado de esfuerzos pueden variar dependiendo de la magnitud de estos, los criterios de falla pueden predecir la fluencia del material o una posible fractura de acuerdo a sus propiedades.

Existen diversos criterios de falla para el análisis de materiales, sin embargo para nuestro caso sólo estudiaremos los de Tresca y Von Mises, siendo este último el que se aplica en la solución por el método de elemento finito para materiales dúctiles.

3.3.5 Criterio del esfuerzo cortante máximo (Tresca).

Este criterio se basa en la observación que sitúa la fluencia de materiales dúctiles como causa por el deslizamiento del material, a lo largo de superficies oblicuas, debido a esfuerzos cortantes. De acuerdo con este criterio, un componente estructural es seguro siempre que el valor máximo τ_{max} del esfuerzo cortante, en ese componente, permanezca por debajo del valor correspondiente del esfuerzo cortante máximo [G].

Los planos de deslizamiento en el material se visualizan aproximadamente a 45° con relación al eje de aplicación de la fuerza (Fig. 3.2).



Figura 3.2 Falla en un material sometido a torsión.

Considerando que σ_y es el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo máximo basado en el círculo de Mohr será de: $\tau_{max} = \sigma_y/2$.

Se determina que el esfuerzo actúa sobre los planos que están a 45° de los planos del esfuerzo principal, indicando que la falla se dará por esfuerzo cortante.

$$\tau_{abs} = \frac{\sigma_{max}}{2} \quad (3.11)$$

$$\tau_{abs} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (3.12)$$

La representación gráfica de cualquier estado de esfuerzos de un material es un hexágono. Se representarán por un punto de coordenadas σ_a y σ_b en donde estos son los esfuerzos principales.

3.3.6 Criterio de la máxima energía de distorsión (Von Mises).

Se basa en el cálculo de la energía de distorsión en un material dado, es decir, de la energía asociada con cambios en la forma del material (distinto de la energía asociada con el cambio de volumen en el mismo material). De tal forma que un componente estructural dado es seguro siempre que el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen en ese material permanezca más pequeño que la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para hacer fluir al material.

La representación gráfica es una elipse, por tanto, un punto de coordenadas σ_a y σ_b que caiga dentro del área mostrada es seguro, siempre que $u_d < (u_d)_Y$.

El criterio de máximo esfuerzo cortante es más conservador que el criterio de la máxima energía de distorsión, ya que el hexágono está localizado dentro de la elipse (Fig. 3.3)

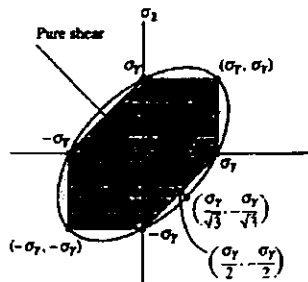


Figura 3.3 Representación de los criterios de falla de Tresca y Von Mises.

El criterio de la máxima energía de distorsión aparece un poco más aproximado que el criterio del máximo esfuerzo cortante en cuanto se refiere a predecir fluencia en torsión.

3.4 LA TOLERANCIA COMO FUNCION DE LA FUERZA DE CORTE.

3.4.1 Tolerancia, definición.

La inevitable imprecisión de los procedimientos de maquinado hace que una pieza no pueda ser obtenida exactamente de acuerdo con las dimensiones fijadas previamente. Ha sido necesario tolerar que la dimensión real obtenida se halle comprendida entre dos medidas límite, compatibles con un funcionamiento correcto de la pieza [H]. La diferencia entre estas dos dimensiones constituye la tolerancia (Fig. 3.4), es decir:

$$\text{medida máxima} - \text{medida mínima} = \text{tolerancia}$$

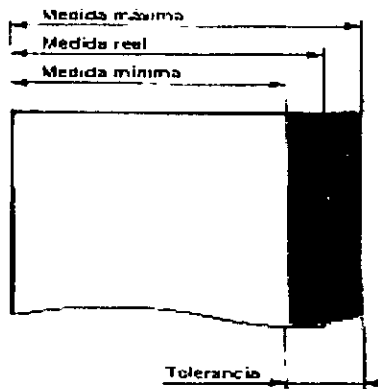


Figura 3.4 Representación de una tolerancia.

El sistema ISO define un conjunto de tolerancias aplicables a las medidas de piezas lisas. Generalmente se simplifica haciendo referencia sólo a piezas cilíndricas en términos de agujero y eje, pero todos los conceptos se aplican para designar el espacio contenido, comprendido entre dos caras paralelas de una pieza cualquiera: ancho de la ranura, grueso de la chaveta, etc.

Para cada dimensión nominal se ha previsto una gama de tolerancias. La importancia de estas tolerancias se simboliza por un número llamado "calidad". Existen 18 calidades: 01-0-1-2-...15-16 cada una de las cuales corresponde a una de las tolerancias fundamentales: IT01-IT0 -IT1-IT2-...IT15-IT16 en función de la dimensión nominal (Tabla 3.1)

Dimensión nominal / Calidad (micras)	Hasta 3 mm incluido	3 a 6 mm	6 a 10 mm	10 a 18 mm	18 a 30 mm	30 a 50 mm	50 a 80 mm	80 a 120 mm	120 a 180 mm	180 a 250 mm
IT5	4	5	6	8	9	11	13	15	18	20
IT6	6	8	9	11	13	16	19	22	25	29
IT7	10	12	15	18	21	25	30	35	40	46
IT8	14	18	22	27	33	39	46	54	63	72
IT9	25	30	36	43	52	62	74	87	100	115
IT10	40	48	58	70	84	100	120	140	160	185
IT11	60	75	90	110	130	160	190	220	250	290
IT12	100	120	150	180	210	250	300	350	400	460
IT13	140	180	220	270	330	390	460	540	630	720
IT14	250	300	360	430	520	620	740	870	1000	1150
IT15	400	480	580	700	840	1000	1200	1400	1600	1850
IT16	600	750	900	1100	1300	1600	1900	2200	2500	2900

Tabla 3.1 Tolerancias fundamentales "IT" en micras.

Un determinado proceso de maquinado no es capaz de proporcionar cualquier calidad o tolerancia que se deseé. La naturaleza de cada uno de los diferentes procesos de arranque de viruta determinará el tipo o rango de tolerancia a obtener. Enfocándonos específicamente a un proceso de fresado, no se puede considerar simplemente que la tolerancia corresponde a los valores de precisión proporcionados por el fabricante. Influyen factores ya mencionados además de la precisión que sea capaz de proporcionar la máquina, como son: la flexión que sufre el cortador, los recrecimientos en el filo de corte, el "cabeceo" o vibración de la herramienta, así como la expansión térmica del material de trabajo, etc. En la tabla 3.2 se muestra las tolerancias comúnmente aceptadas dependiendo del proceso de maquinado realizado. En esta tabla se obtiene el valor de "IT" para obtener el valor de la tolerancia según la tabla 3.1.

Proceso	Tolerancia IT	Proceso	Tolerancia IT
Taladrado	De precisión	Escariado	medio
	Medio		corriente
Brochado	De precisión	Cepillado	de precisión
	Medio		medio
Electro-erosión	De precisión	Rectificado	de precisión
	Medio		medio
Fresado	De precisión	Torneado	de precisión
	Medio		medio
	Corriente		corriente

Tabla 3.2 Tolerancias comúnmente aceptadas para piezas obtenidas por arranque de viruta.

3.4.2 Las tolerancias en el proceso de fresado y las fuerzas de corte.

Como se observa en la tabla 3.2 para determinado proceso de fresado, existe un rango de tolerancia que es comúnmente aceptado; es decir que la tolerancia obtenida en un proceso de desbaste será mucho más abierta que para un proceso de acabado. Aún utilizando maquinaria CNC en excelentes condiciones, en las cuales se puede asegurar que los elementos de la máquina no tendrán variaciones superiores a una precisión de ± 0.005 mm, aún así la tolerancia obtenida será tan abierta o cerrada según lo marque el tipo de proceso. Por tanto, la variación de la dimensión nominal será debida principalmente a la flexión que sufre el cortador durante el proceso de corte. Esta flexión es producida por la fuerza que opone el material de trabajo en la arista o filo de corte de la herramienta. La fuerza de corte origina esfuerzos de cierta magnitud en el cuerpo del cortador, así como un desplazamiento tanto radial como tangencial al eje de giro de la herramienta. La magnitud del desplazamiento radial y tangencial del cortador, dependerá directamente de la magnitud de la fuerza de corte involucrada en el proceso, siendo la fuerza más elevada para procesos de elevado desempeño o desbaste.

3.4.3 Hipótesis.

Las componentes radiales, tangenciales y axiales de la fuerza de corte deben ser vencidas por la máquina-herramienta para poder efectuar el corte. La fuerza axial generalmente es soportada por los rodamientos del husillo y del eje vertical de movimiento de la máquina. La fuerza radial es soportada por la estructura en su conjunto y elementos de fijación de la máquina (prensa, mesa, etc.). Solamente es la fuerza tangencial la que debe ser vencida por el motor del husillo para realizar el corte. El par proporcionado por el motor debe ser superior a la fuerza tangencial que opone el material durante el corte para lograr el desprendimiento sucesivo de virutas.

Se debe considerar también, que actualmente existen diferentes tipos y materiales para herramientas que son recomendables para diferentes aplicaciones y condiciones de operación, lo cual influirá en la magnitud de fuerza de corte. Por lo tanto se debe determinar el valor de las fuerzas de corte involucradas en los diferentes tipos de fresado y descomponerlas en sus componentes radial, axial y tangencial, siendo la componente tangencial la que se utiliza para determinar el par requerido.

3.5 METODOS CONVENCIONALES PARA MEDICIÓN DE FUERZAS.

Existen diferentes métodos para determinar las fuerzas de corte en las diferentes máquinas-herramienta. Se han desarrollado equipos, que bajo diversos principios de funcionamiento, permiten una medición indirecta o directamente. La complicación existente para utilizar este tipo de equipos es su elevado costo y complicada operación, al requerir acondicionamiento especial en las máquinas donde se requiera montarlos.

Algunos de los equipos que se han utilizado para determinar las fuerzas de corte se basan en los principios brevemente mencionados a continuación.

3.5.1 Medición hidráulica.

Consiste en una medición indirecta por medio de manómetros que miden la presión de cilindros cuyos pistones son acoplados mediante sistemas de palancas a la herramienta y pieza de corte para ampliar los desplazamientos de ambos durante el corte y registrarlos.

Este principio es uno de los más antiguos y es de muy baja sensibilidad; por lo que su utilización no es muy confiable.

3.5.2 Medición neumática.

Este método de medición es basado en el dinamómetro neumático, en el cual, dentro de una cámara con aire comprimido y con un orificio en una de las paredes, el cual se le acopla a una pared plana por medio de un conducto. Dicha pared es móvil y se aleja o acerca a la cámara dependiendo de alguna fuerza externa, variando así la presión.

Para el propósito de determinación de fuerzas, la pared móvil se acopla a los elementos de la máquina que se someten a las fuerzas de corte y que tienden a desplazarse para determinar la variación de presión que ejercen en la cámara.

3.5.3 Medición eléctrica.

Este método de medición es el que mayor ventajas ofrece. Permite la medición de fuerzas instantáneas y medias. Este método de medición se subdivide según el elemento eléctrico en el que se base el funcionamiento:

a) Método por resistencia.

Este método tiene su principio en dos recipientes que contengan algún fluido electrolítico y que están comunicados por una abertura de cierta sección, en la cual, una de sus paredes es una membrana que se deforma por una fuerza externa y que disminuye la sección de la abertura. Además, en cada uno de los recipientes se coloca un electrodo para hacer circular corriente.

La membrana flexible es acoplada a los elementos de la máquina que le transmitirán la deformación por la fuerza del corte. Al variar el área de paso del fluido, varía la corriente y es registrada en un indicador como función de las fuerzas de corte.

Tiene la desventaja de que es difícil mantener constantes los parámetros necesarios para realizar la medición.

b) *Método por capacitancia.*

En este método, se utiliza también una membrana flexible que origina una variación de la separación entre armaduras al aplicársele una fuerza. Esta variación de separación origina un cambio en la capacitancia del elemento, la cual se puede registrar. Tiene la ventaja de que al no utilizar electrolito, es más sencillo conservar sus constantes de operación.

c) *Método del cuarzo piezoeléctrico.*

Es uno de los mejores métodos empleados y su principio es el siguiente; el cuarzo al ser sometido a una elevada presión, produce un campo eléctrico proporcional a ella. Además, al ser el cuarzo un material de alta rigidez, su deformación es mínima.

Se colocan cristales de cuarzo entre el husillo portaherramientas y los elementos de sujeción de la máquina. Durante el corte, se producirán variaciones de potencial en el cuarzo que serán registradas.

El inconveniente de estos equipos en general, es su elevado costo y dificultad de operación. Es además complicada la adaptación de estos equipos a cualquier tipo de máquinas y a su limitada flexibilidad de adaptarse a diferentes condiciones de corte.

Por ello se considera importante desarrollar una metodología de modelado para determinar las fuerzas de corte. Utilizar herramientas como un sistema de análisis por elemento finito es de gran utilidad, ya que nos permitirá determinar las condiciones de operación (principalmente las fuerzas de trabajo) durante el proceso de corte, antes de realizarlo físicamente, con todas las complicaciones que ello implica.

3.6 EL METODO DE ELEMENTO FINITO COMO HERRAMIENTA PARA LA DETERMINACION DE LAS FUERZAS DE CORTE.

3.6.1 El método de elemento finito, definición.

El elemento finito es un método que nos permite conocer la solución aproximada del modelo matemático de un fenómeno físico.

En el elemento finito el sólido es discretizado por un número finito de elementos, no sólo en sus nodos, sino a lo largo de fronteras en inter-elementos hipotéticos. Dichos elementos son finitos e individuales de un cuerpo elástico e isotrópico [F].

El caso más general de análisis se presenta para un estado tridimensional de esfuerzos, donde las variables de las ecuaciones se representarán en un sistema cartesiano (x,y,z) y sus condiciones son las siguientes:

$$u = [u, v, w]^T \quad (3.13)$$

donde u,v y w son los desplazamientos en las direcciones de x,y,z, de igual forma los esfuerzos y las deformaciones se representan así:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}]^T \quad (3.15)$$

Por lo tanto de la ecuación 3.3:

$$\sigma = D\varepsilon$$

La matriz D de (6x6) es la que contiene las propiedades del material.

La relación entre desplazamientos y deformaciones pueden representarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad (3.16)$$

Desarrollando la ecuación que modela un sistema tridimensional, se obtiene la ecuación 3.17 de la forma:

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}]^T = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5-\nu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Asimismo se deben considerar las fuerzas de cuerpo y los elementos de tracción:

$$f = [f_x, f_y, f_z]^T \quad (3.18)$$

$$T = [T_x, T_y, T_z]^T \quad (3.19)$$

Las componentes de todas las ecuaciones ahora están representadas para cada uno de los ejes del sistema cartesiano.

Para este tipo de análisis tridimensionales se desconocen las variables de los esfuerzos, las funciones de desplazamientos y las deformaciones, por lo que estas

ecuaciones deben ser resueltas por el método de solución aproximado llamado de la Energía Potencial, mismo que a continuación se presenta para el caso de análisis unidimensional.

La energía potencial total Π en un cuerpo elástico se define como la suma total de la energía de deformación y el potencial de trabajo, esta se representa de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Pi &= \text{energía de deformación} + \text{energía potencial} \\ &\quad (U) \qquad\qquad\qquad (WP) \end{aligned}$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int \sigma^T \epsilon dV - \int u^T f dV - \int u^T T dS - \sum_i u_i^T P_i \quad (3.20)$$

De tal forma que la sustituir las variables de esfuerzos, funciones de desplazamientos y deformaciones, simplificando, la ecuación final de análisis es:

$$KQ = F \quad (3.21)$$

Donde K es la matriz de rigidez, F es el vector global de carga, y Q es el vector de desplazamientos global.

De esta ecuación sus términos son conocidos y se puede resolver despejando la variable desconocida. La ecuación debe ser aplicada para cada uno de los nodos generados en nuestro modelo, por lo que a mayor cantidad de estos, la ecuación crecerá y se necesitará de una computadora para resolverla.

Por lo tanto, debido que los cortadores verticales tienen una sección transversal no constante y por su diseño incorporan características específicas, y además su análisis se presenta en tres dimensiones, es necesario la utilización de un software para la solución por elemento finito.

El método de elemento finito tiene un procedimiento de solución similar para los análisis unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales. Sabiendo que para los análisis tridimensionales las ecuaciones que se generan están en función de los tres ejes cartesianos, la complejidad para su solución aumenta. Sin embargo, para los problemas unidimensionales, los esfuerzos, las deformaciones, los desplazamientos y las cargas dependerán exclusivamente de una variable X.. Por lo tanto, para comprender el proceso de solución por elemento finito se hace referencia al análisis unidimensional, dado que las ecuaciones a resolver son sencillas para solucionar.

3.6.2 Análisis unidimensional.

La ecuación que resulta para el estudio de los esfuerzos y deformaciones es la siguiente:

$$\{\sigma\}_e = [D]\{\varepsilon\}_e \quad (3.3)$$

Como ya se mencionó, D es la matriz de propiedades y donde podemos encontrar una relación con el modulo de Poisson, y el módulo de Young, σ el tensor de esfuerzos y ε la matriz de deformaciones.

Nótese que los esfuerzos están relacionados a las deformaciones y estos a su vez relacionados con los desplazamientos, esto requiere la solución de ecuaciones diferenciales parciales. La solución de este tipo de ecuaciones generalmente se asocia a soluciones exactas. Este tipo de soluciones está determinada a geometrías y condiciones de carga simples. Los problemas más complejos, debido a sus geometrías, condiciones de carga, condiciones frontera se vuelven prácticamente irresolubles, por tanto es necesario la aplicación de métodos de solución aproximada como el de la Energía potencial.

El método de la Energía Potencial es un procedimiento que utiliza el método de elemento finito como un auxiliar en el proceso de solución. Este es un método que da una aproximación del resultado real [1].

La energía potencial total Π en un cuerpo elástico se define como la suma total de la energía de deformación y el potencial de trabajo, esta se representa de la siguiente forma:

$$\Pi = \underset{(U)}{\text{energía de deformación}} + \underset{(WP)}{\text{energía potencial}}$$

Para la energía de deformación U:

$$U = \frac{1}{2} \int \sigma^T \varepsilon dV \quad (3.22)$$

y para la energía potencial:

$$WP = - \int u^T f dV - \int u^T T dS - \sum_i u_i^T P_i \quad (3.23)$$

Por lo tanto, el potencial total para un cuerpo elástico en general la ecuación aplicable es la siguiente:

$$\Pi = \frac{1}{2} \int \sigma^T \varepsilon dV - \int u^T f dV - \int u^T T dS - \sum_i u_i^T P_i \quad (3.20)$$

donde:

V: volumen del cuerpo discretizado.

S: porción de área frontera donde actúan las fuerzas.

f: Fuerzas de cuerpo por unidad de volumen.

T: esfuerzo de tracción.

u: desplazamientos.

P: Cargas aplicadas en un punto P.

Haciendo referencia al análisis unidimensional de un elemento, el cual se encuentra empujado por uno de sus extremos, mientras por el otro se le aplica una carga a lo largo de su eje.

Las ecuaciones que representan el comportamiento de este problema se presentan a continuación:

$$u = u(x) \quad \sigma = \sigma(x) \quad \varepsilon = \varepsilon(x) \quad (3.24)$$

$$T = T(x) \quad f = f(x) \quad (3.25)$$

Las relaciones entre los esfuerzos y las deformaciones son las siguientes:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (3.26)$$

Por lo tanto, para una dimensión:

$$dV = A dx \quad (3.27)$$

Cuando se discretiza nuestro elemento se crean n números de nodos, y a cada uno de estos se les asignan grados de libertad, en este caso en específico, se obtiene solo un grado de libertad por estar referido a un eje. De tal forma que los desplazamientos serán: Q_1, Q_2, \dots, Q_n , con estas componentes hallaremos la matriz de desplazamientos Q . Las cargas para cada uno de los nodos se representará en una matriz $F=(F_1, F_2, \dots, F_n)^T$.

Definiendo un sistema de coordenadas natural o intrínseco denotado por ξ como:

$$\xi = \frac{2}{x_2 - x_1} (x - x_1) - 1 \quad (3.28)$$

Partiendo de esta ecuación, se obtienen las ecuaciones:

$$N_1(\xi) = \frac{1-\xi}{2} \quad y \quad N_2(\xi) = \frac{1+\xi}{2} \quad (2.29)$$

Estas ecuaciones son llamadas funciones de Forma. Una vez que las funciones de forma han sido definidas, el campo de desplazamientos lineales dentro del elemento pueden ser escritas en términos de los desplazamientos nodales q_1 y q_2 como sigue:

$$u = N_1 q_1 + N_2 q_2 \quad (3.30)$$

en notación de una matriz:

$$u = Nq \quad (3.31)$$

donde:

$$N = [N_1, N_2] \quad q = [q_1, q_2] \quad (3.32)$$

Se determina que $u = q_1$ en el nodo 1, $u = q_2$ en el nodo 2 y además u varía linealmente.

Haciendo la transformación de x a ξ , esta puede ser escrita como:

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2 \quad (3.33)$$

Entonces:

$$u = N_1 q_1 + N_2 q_2 = \frac{1-\xi}{2} q_1 + \frac{1+\xi}{2} q_2 \quad (3.34)$$

Aplicando la ecuación de la deformación:

$$\varepsilon = \frac{du}{dx} \quad (3.35)$$

usando la regla de la cadena:

$$\varepsilon = \frac{du}{d\xi} \frac{d\xi}{dx} \quad (3.36)$$

se obtiene:

$$\frac{d\xi}{dx} = \frac{2}{x_2 - x_1} \quad (3.37)$$

De igual forma tenemos:

$$\frac{du}{d\xi} = \frac{-q_1 + q_2}{2} \quad (3.38)$$

Por lo tanto:

$$\varepsilon = \frac{1}{x_2 - x_1} (-q_1 + q_2) \quad (3.39)$$

Esta ecuación se puede escribir de la siguiente forma:

$$\varepsilon = Bq \quad (3.40)$$

Aplicando la Ley de Hooke:

$$\sigma = EBq \quad (3.41)$$

Ahora se tienen las ecuaciones:

$$u = Nq, \quad \varepsilon = Bq, \quad \sigma = EBq \quad (3.42)$$

Estas están relacionadas a los desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en términos de valores de los nodos. Ahora estas expresiones se pueden sustituir en la expresión de la energía Potencial.

Una vez que nuestro modelo se ha discretizado en elementos finitos, la expresión Π adquiere la forma:

$$\Pi = \sum_e \frac{1}{2} \int \sigma^T \varepsilon dV - \sum_e \int u^T f dV - \sum_e \int u^T T dS - \sum_i Q_i P_i \quad (3.43)$$

Simplificando la ecuación, los términos de energía de deformación son los siguientes:

$$U_e = \frac{1}{2} \int q^T B^T EBq A dx \quad (3.44)$$

si:

$$dx = \frac{l_e}{2} d\xi \quad (3.45)$$

donde: $-1 \leq \xi \leq 1$

$$U_e = \frac{1}{2} q^T \left[A_e \frac{l_e}{2} E_e B^T B \right]_{-1}^1 d\xi q \quad (3.46)$$

Integrando y simplificando:

$$U_c = \frac{1}{2} q^T k^e q \quad (3.47)$$

Para lo cual k^e es la matriz de rigidez sus términos son los siguientes:

$$k^e = \frac{E_c A_c}{l_c} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

Ahora los términos de la Energía potencial:

$$\int u^T f A dx = A_c f \int (N_1 q_1 + N_2 q_2) dx \quad (3.49)$$

Simplificando similarmente a la ecuación de deformación:

$$\int u^T f A dx = q^T \frac{A_c}{2} l_c f \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.50)$$

ahora se puede escribir de la siguiente forma:

$$\int u^T f A dx = q^T f^e \quad (3.51)$$

donde f^e es el vector de las fuerzas de cuerpo y se define como sigue:

$$f^e = \frac{A_c l_c}{2} f \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.52)$$

Para el elemento de esfuerzo de tracción:

$$\int u^T T dx = \int (N_1 q_1 + N_2 q_2) T dx \quad (3.53)$$

Simplificando:

$$\int u^T dx T = q^T T^e \quad (3.54)$$

Donde el elemento de tracción está determinado por la siguiente ecuación:

$$T^e = \frac{T l_c}{2} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (3.55)$$

Ahora la ecuación de La Energía Potencial:

$$\Pi = \frac{1}{2} Q^T K Q - Q^T F \quad (3.56)$$

donde K es la matriz de rigidez, F es el vector global de carga, y Q es el vector de desplazamientos global.

En esta ecuación podemos observar que las variables ahora son conocidas y fáciles de interpretar.

Planteando las condiciones de frontera y simplificando la última ecuación, obtenemos lo siguiente:

$$KQ = F \quad (3.21)$$

donde sólo queda en función de la matriz de rigidez, el vector de desplazamientos y el vector de fuerzas.

Como ya se había planteado anteriormente, este proceso de solución es similar para modelos tridimensionales, sólo que sus ecuaciones son más complejas por lo que solo se ha expuesto el análisis unidimensional para tratar de comprender el proceso de solución.

Capítulo 4.

Presentación de metodología y resultados.

4.1 PORQUE UTILIZAR EL METODO DE ELEMENTO FINITO.

Como se ha expuesto en capítulos anteriores, existe una enorme dificultad para analizar el proceso de corte en cortadores verticales. Los diversos estudios en teoría de corte no han sido capaces de establecer ecuaciones para modelar el corte oblicuo de una manera confiable, solo existe una serie de relaciones que tratan de dar un resultado aproximado. Es claro que el corte con cortadores verticales se debe analizar como un corte oblicuo, ya que como se ha expuesto, existe una enorme variedad de diseños con diferentes ángulos de ataque, geometrías en el filo de corte, rompevirutas, etc. lo cual dificulta aun más el análisis teórico del proceso de corte apoyándose simplemente en una teoría de corte ortogonal u oblicua.

También se ha mencionado que existe una flexión, así como un estado de esfuerzos en la herramienta de corte, por lo que es necesario considerar la herramienta como un sólido elástico, para lo cual se deben encontrar las ecuaciones que relacionan los esfuerzos, las deformaciones y las características del material, estas a su vez requieren la solución de ecuaciones diferenciales parciales como ya se ha discutido, por lo que se recurren a métodos de solución aproximada como el de la Energía Potencial para resolverlas.

Para analizar elementos como los cortadores verticales, se vio que las ecuaciones que modelan las condiciones de esfuerzos y deformaciones durante el proceso de corte son de la forma:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (3.9)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad \gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (3.10)$$

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}]^T \quad (3.14)$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}]^T \quad (3.15)$$

$$\varepsilon = \left[\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right]^T \quad (3.16)$$

Estas tienen componentes en tres dimensiones, siendo muy complejas para resolverlas por cualquier método analítico, con lo cual es necesario recurrir a un método de solución aproximada para solucionar el modelo, siendo en este caso un sistema de elemento finito la mejor opción para resolver el modelo según el sistema de ecuaciones que ya se ha planteado para resolver.

Se debe seleccionar el sistema de solución por el método de elemento para la aplicación específica, considerando las ventajas y desventajas al utilizar alguno de ellos. Algunos de estos sistemas son COSMOS, NISA Display, MSC/Incheck, el modulo utilizado en SolidWorks, CATIA o I-DEAS.

Como sistema integrado de simulación y solución del modelo de un cortador vertical por el método de elemento finito hemos seleccionado el sistema MSC/Incheck para Mechanical Desktop de The MacNeal-Schwendler Corporation. La ventaja que presenta MSC/InCheck es que se puede adquirir como un modulo de Mechanical Desktop, sistema CAD de Autodesk que es ampliamente utilizado para diseño mecánico en México por su amigable interfase gráfica y sus herramientas para crear los modelos geométricos que son algunas de las utilizadas por AUTOCAD. MSC/Incheck reconoce los modelos geométricos elaborados en Mechanical Desktop para su solución por elemento finito ya que es un programa completamente integrado que permite trabajar directamente con esta interfase. Esto evita la necesidad de exportar archivos desde un sistema CAD e importarlos al sistema de solución, ya que muchas veces, este procedimiento provoca pérdidas o alteración de la información. MSC/InCheck tiene la capacidad para resolver modelos de análisis de esfuerzos, vibración, distribución de temperaturas, etc. de modelos sólidos.

MSC/Incheck utiliza MSC/NASTRAN como el solucionador integrado para resolver los modelos de los diferentes tipos de simulación. MSC/NASTRAN es el líder mundial en desarrollo de programas solucionadores de propósito general para problemas de ingeniería utilizando el método de elemento finito, ha sido desarrollado y adaptado a

diferentes plataformas por The MacNeal-Schwendler Corporation con base en NASTRAN que es propiedad de la NASA (National Aeronautics and Space Administration). MSC/NASTRAN para Windows 95 o NT puede utilizarse en sistemas CAD que utilizan esta plataforma. Entre otras funciones, NASTRAN puede solucionar modelos de transferencia de calor, análisis de frecuencia, respuesta de modelos geométricos estáticos de materiales no lineales, etc.

4.2 CONSIDERACIONES Y SIMPLIFICACIONES.

No es posible generar un modelo que contenga todas las variables que intervienen en un fenómeno como es el caso de un proceso de corte, aun apoyándose en la utilización de un método numérico, se necesita plantear el modelo efectuando algunas simplificaciones y consideraciones de algunas variables que intervengan en el modelo.

Para poder generar un modelo de simulación en MSC/InCheck es necesario tomar ciertas consideraciones en cuanto a las condiciones, geometría y variables que intervienen en el modelo, de tal forma que los datos que se requieran ingresar al modelo, tengan cierta simplificación para que puedan ser aceptados por el sistema y se obtenga una solución satisfactoria al modelo que se ha creado.

Las consideraciones y simplificaciones efectuadas para la creación del modelo en MSC/InCheck son las siguientes:

- a) El modelo generado es un modelo estático. Se considera que no existe aceleración angular del cortador y las fuerzas de corte y los desplazamientos que se producen cuando el cortador gira a cierta velocidad angular sobre su eje desprendiendo material de trabajo con el álabe de corte si son variables en el modelo.
- b) Se considerará que el material del cortador es un medio continuo isotrópico homogéneo.
- c) Se considerará que el cortador trabaja como una parte integrada al husillo. Por tanto se determina que el cortador trabajará sin fallar, ya que se opera bajo las condiciones y para la aplicación que ha sido diseñado.
- d) Se considerará la geometría del cortador como un cuerpo sólido con un sólo álabe de corte. Esto debido a que los rangos de diámetros establecidos en los casos de estudio son cortadores con uno o dos álabes. Pero es claro que aun en el caso de un cortador con dos álabes nunca los dos filos cortarían simultáneamente en un proceso de avance lineal, solamente uno de los dos realiza el arranque de viruta. Esto sucede aún en un corte de ranurado completo donde sólo uno de los álabes trabaja mientras el otro no trabaja.
- e) Se considerará que el cortador esta restringido o empotrado en la parte superior donde comenzaría el dispositivo de sujeción de la herramienta. Esta restricción tiene la finalidad establecer en esta zona las fuerzas de reacción a las que se somete la herramienta, es decir

las fuerzas de corte producto de la flexión que sufre el cortador. Al descomponer estas fuerzas en sus componentes radiales y tangenciales es posible determinar la fuerza con la que se opone el material de trabajo y por tanto el torque requerido para vencer esta oposición y lograr el corte.

f) Se ingresarán como desplazamientos correspondientes los valores de las tolerancias aceptadas para diferentes procesos de corte, por ejemplo desbaste y acabado, una vez que se considera que los desplazamientos en los elementos de la máquina son despreciables y que las variaciones dimensionales o tolerancia son inherentes al proceso de corte, esto representa la hipótesis del presente trabajo.

g) Los desplazamientos debido a la flexión del cortador serán máximos en la arista de corte inferior del cortador. Esta condición se cumple para el análisis independientemente de la profundidad de corte, ya que a su vez se considera que el cortador trabaja a la profundidad que establece el fabricante para el proceso en cuestión. Al considerar un desplazamiento máximo en un extremo y un anclaje en el otro, el modelo tendría cierta similitud al caso de una viga en cantiliver, pero como se ha establecido, el hecho de que el cortador no tenga una sección transversal constante, y que se desconozca el valor de las fuerzas que provocan dicho desplazamiento, nos llevaría a plantear un sistema de ecuaciones cuya solución analítica es muy compleja, lo que nos lleva a la solución con un método de solución aproximada.

h) El caso de cortadores que implican ensambles de sólidos (en específico el caso de cortadores con insertos intercambiables) son excluidos del modelo, ya que el sistema no acepta el modelado de ensambles.

4.3 METODOLOGIA.

4.3.1 Generación de los modelos geométricos de cortadores verticales.

El objetivo de esta metodología es obtener el modelo geométrico de cortadores verticales, efectuar su análisis para la obtención de las fuerzas de corte mediante un sistema de solución por el método de elemento finito y calcular el par requerido para procesos de fresado.

Una vez que se han establecido las simplificaciones y consideraciones pertinentes para desarrollar el modelo de simulación de cortadores verticales, es necesario crear el modelo geométrico en el sistema CAD Mechanical Desktop que contenga las características que ya se han considerado (Fig. 4.1).

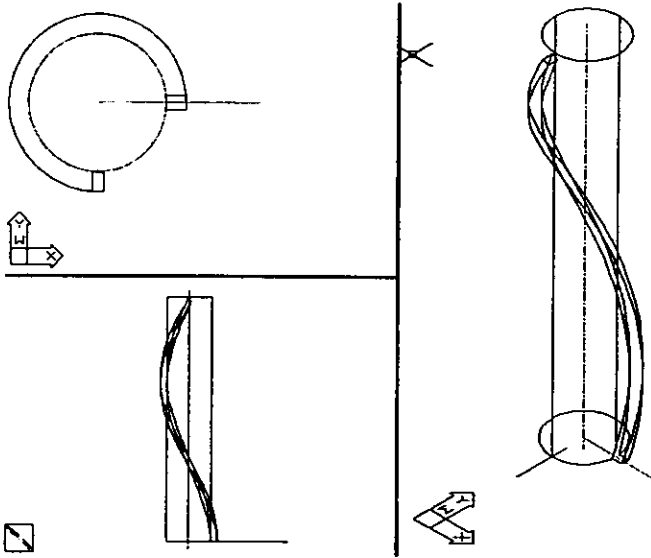


Figura 4.1 Modelo geométrico simplificado de un cortador vertical generado en Mechanical Desktop.

4.3.2 Generación del modelo para solución con Elemento Finito.

Una vez que se ha generado el modelo geométrico, ahora es necesario generar el modelo de simulación en MSC/Incheck, para lo cual se sigue el siguiente procedimiento para ingresar los datos necesarios:

4.3.2.1 Modelo.

Se debe establecer un nombre para el modelo y el tipo de análisis a realizar. Para el modelo que utilizamos, se selecciona un análisis de esfuerzos.

4.3.2.2 Sistema de coordenadas.

Se establece el sistema de coordenadas a utilizar. En nuestro caso se selecciona un sistema de coordenadas cilíndrico con el propósito de poder descomponer las fuerzas de reacción en componentes radiales, tangenciales y axiales. El origen del sistema se sitúa sobre le eje de giro del cortador en la cara inferior.

4.3.2.3 Material.

Se debe asignar un material al modelo que se desea simular, así como ingresar las propiedades que se solicitan para poder efectuar el análisis. Para nuestra simulación utilizamos como materiales el Acero de Alta Velocidad HSS y Carburo de Tungsteno cuyas propiedades se listan a continuación.

- *Acero de alta velocidad (HSS):*

Módulo de Young:	$3.05941 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Módulo de Poisson:	0.22
Módulo de cortante:	$1.2538 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Densidad de masa:	$7.86 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$
Coef. de expansión térmica:	$1.2 \times 10^{-5} \text{ m/m/K}$
Esfuerzo permisible:	$7.0052 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Máximo esfuerzo de cedencia:	$8.4323 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
Conductividad térmica:	$5.6 \times 10^1 \text{ J/seg m K}$
Calor específico:	$4.6 \times 10^2 \text{ J/Kg K}$

- *Carburo de tungsteno (WC):*

Módulo de Young:	$6.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Módulo de Poisson:	0.16
Módulo de cortante:	$2.9741 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
Densidad de masa:	$1.5 \times 10^4 \text{ Kg/m}^3$
Coef. de expansión térmica:	$6.5 \times 10^{-6} \text{ m/m/K}$
Esfuerzo permisible:	$2.62 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Máximo esfuerzo de cedencia:	$2.0 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
Conductividad térmica:	----
Calor específico:	----

4.3.2.4 Cargas.

Una vez que se ha especificado el material, se deben ingresar las cargas a las que el modelo es sometido: estas cargas pueden establecerse como fuerzas y/o desplazamientos forzados aplicados en alguna parte de la geometría del modelo. En nuestro caso se establece un desplazamiento tangencial en la arista inferior de corte en dirección +Y que es la dirección hacia donde se flexionaría el cortador para el instante en que se encontrara en la posición mostrada en la figura 4.2. El valor del desplazamiento será variable en función del proceso de corte.

4.3.2.5 Restricciones.

Las restricciones se describen como la forma en que el modelo es empotrado. Se debe establecer que parte de la geometría del modelo esta fija o anclada con el propósito de establecer los puntos de aplicación de las fuerzas de reacción. En el modelo se establece la cara superior como la zona restringida, ya que como se consideró, será la zona donde termina el cuerpo del cortador y comienza el sistema de sujeción de la herramienta. Los puntos de aplicación de las fuerzas de reacción serán los nodos que coincidan en su posición con la cara superior del cortador. (Fig. 4.2).

4.3.2.6 Nodos, elementos y mallado.

Antes de efectuar el análisis, el modelo debe ser dividido en elementos finitos. La distancia entre cada nodo definirá el tamaño y cantidad de elementos. Existen diferentes geometrías que son utilizadas para generar los elementos en los sistemas de solución por elemento finito. MSC/Incheck utiliza sólo elementos con geometría tridimensional tetraédrica de orden cuadrático. El número de nodos depende del tamaño seleccionado del elemento. Este último se selecciona a partir de un rango que recomienda el sistema de acuerdo al tamaño y forma del modelo (ver apéndice 1).

El tamaño de los elementos deberá seleccionarse de tal forma que la malla tridimensional que une los nodos se ajuste lo mejor posible a la geometría del modelo. Un número insuficiente de elementos y sus nodos correspondientes, dará como resultado una solución al modelo inexacta y muy poco confiable. A medida que la malla contiene mayor número de elementos, la solución obtenida será más confiable.

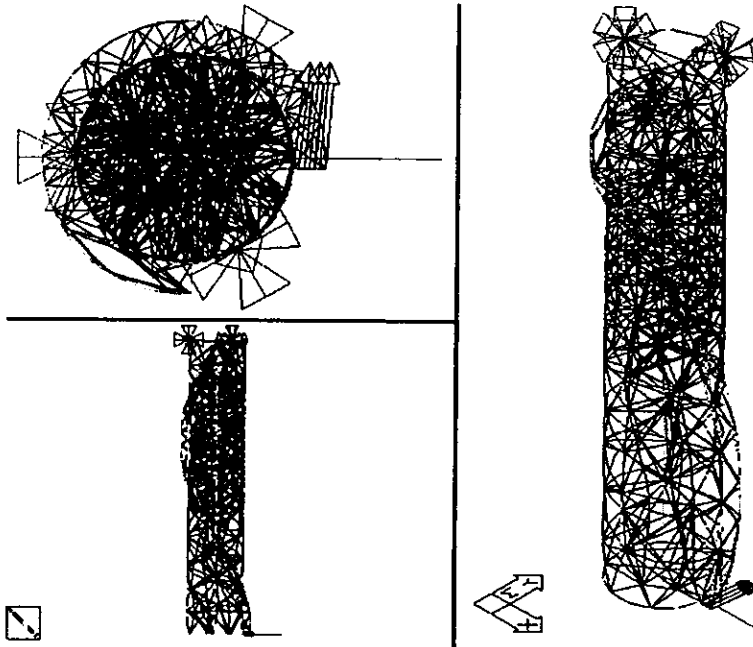


Figura 4.2 Modelo para simulación de un cortador vertical generado en MSC/InCheck. El modelo cuenta con 857 elementos y 1468 nodos. En la parte inferior derecha se observa la zona de aplicación y dirección del desplazamiento y en la cara superior la representación del anclaje.

4.3.2.7 Análisis.

Una vez que se ha alimentado el sistema con todos los valores pertinentes, se procede a efectuar el análisis. El conjunto de valores que se han ingresado en MSC/Incheck son procesados generándose un archivo con información que el solucionador MSC/NASTRAN procesa; este archivo contiene las coordenadas de los nodos, los nodos que han sido restringidos o donde se ha aplicado alguna carga y los valores de todos los parámetros. Una vez terminado el análisis, MSC/NASTRAN genera un archivo de resultados que ahora MSC/InCheck interpreta para convertirlos a una representación gráfica para que puedan ser manipulados por el operador.

4.3.2.8 Ventana de representación gráfica de resultados.

En la ventana de representación gráfica existen diferentes opciones para desplegar los resultados obtenidos durante el análisis como son:

- Desplegar la distribución de los esfuerzos a los que se somete el modelo como resultado de la aplicación de las cargas utilizando una barra de colores.
- Desplegar los desplazamientos de las diferentes zonas del modelo, representando su magnitud también mediante una barra de colores.
- Mostrar las fuerzas de reacción del modelo representadas en los nodos que se encuentran en la zona de restricción.
- Efectuar una animación del modelo que muestra el desplazamiento en la geometría, a medida que se incrementa la carga aplicada.

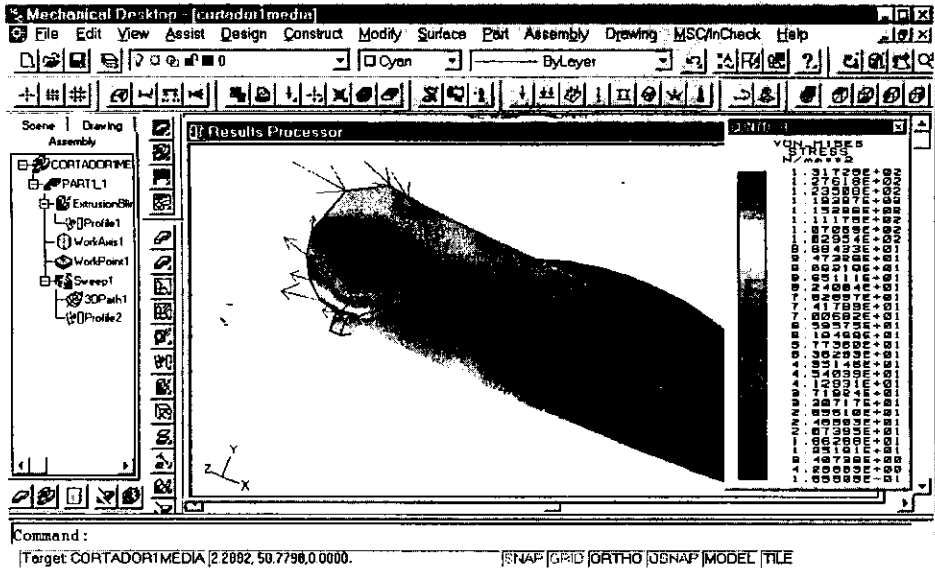


Figura 4.3 Ventana de representación gráfica de MSC/Incheck donde se presenta en una escala de colores los esfuerzos en un cortador con diámetro de 1 pulg.

4.3.3 Obtención de la fuerza de corte resultante y el torque requerido.

Una vez efectuado el análisis, MSC/NASTRAN genera un archivo en forma de texto que contiene toda la información del resultado del análisis. Esta información incluye:

- Las coordenadas y número de todos los nodos generados.
- Los nodos donde se aplica alguna carga y la magnitud de esta.
- Los nodos que han sido restringidos.
- El valor de los esfuerzos a los que se somete cada nodo por efecto de las cargas.
- La magnitud y dirección del desplazamiento que sufre cada nodo respecto al origen del modelo.
- El valor de las fuerzas de reacción en los nodos restringidos en coordenadas radial, tangencial y axial.

Como se ha considerado, solamente las componentes tangenciales de la fuerza de corte son las que debe vencer la potencia del husillo para efectuar el arranque de material de trabajo. Por tanto es necesario calcular el par asociado a la componente tangencial de la fuerza de reacción aplicada en cada nodo restringido y finalmente sumar todos los pares asociados a los nodos restringidos para obtener el torque total requerido en la máquina. Como ejemplo, para el análisis de un cortador de 1pulg sometido a un desplazamiento correspondiente a un medio maquinado, los valores que MSC/NASTRAN calcula para las fuerzas de reacción son los siguientes:

*fem_results_data_on_nodes

REACTION_FORCE

2 1 0 0 0

F

1 1 1

FORCE

Node:

	Fr	Ft	Fz
109	6.86541E+01	-6.50081E+00	2.98971E+02
162	1.12374E+02	-1.58592E+02	8.40214E+02
164	7.27719E+01	-4.01683E+01	7.42701E+02
165	-1.77318E+02	-1.11904E+02	1.09441E+03
166	-1.53216E+02	-3.68013E+01	4.19278E+02
167	1.10789E+01	-2.14667E+02	5.23419E+01
169	3.96955E+02	-5.78672E+01	-1.40490E+03
170	9.49984E+01	-2.64003E+02	-8.50527E+02
171	-7.41516E+01	-2.47346E+02	-9.96521E+02
172	-1.06796E+02	-7.06634E+01	-4.00142E+02
173	-1.51223E+02	-2.55540E+01	-5.03846E+02
192	-4.66519E+00	-5.90345E+01	0.00000E+00

*end

Donde los nodos 109, 162, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173 y 192 son los nodos que se han restringido o anclado y las columnas de Fr, Ft y Fz corresponden a las fuerzas de reacción aplicadas en el nodo en sus componentes radial, tangencial y axial respectivamente.

Ahora para calcular el par total requerido:

$$T = r \times \Sigma Ft$$

donde: T es el par requerido.

r es el radio de la herramienta.

ΣFt es la sumatoria de las fuerzas tangenciales de reacción.

Debido a que existen pérdidas de potencia y torque transmitido, es necesario tomar en cuenta la eficiencia del ensamble desde el motor hasta la sujeción en el husillo. Según información proporcionada por diseñadores de Centros de Maquinado CNC, la eficiencia de la máquina será del 75% cuando la transmisión, los baleros y lubricación funcionan adecuadamente. Por tanto, el valor del torque nominal de la máquina-herramienta para efectuar el proceso de corte será:

$$T_n = T/\eta$$

donde: T_n es el torque nominal de la máquina.

η es la eficiencia de la máquina.

El mismo procedimiento para el cálculo de la fuerza de corte resultante y el torque nominal requerido, se efectúa para los diferentes análisis realizados para poder determinar como varía el requerimiento de torque en la máquina dependiendo de los diferentes procesos de corte que se pretende realizar en ella.

4.3.4 Cálculo de la velocidad del husillo.

Ahora es necesario determinar la velocidad del husillo necesaria para efectuar el proceso de corte. Con ello tendremos otra especificación a considerar para la selección de la máquina-herramienta adecuada para realizar el tipo de proceso en cuestión.

La velocidad del husillo se obtiene directamente de los parámetros de corte recomendados por el fabricante de la herramienta a utilizar en el proceso.

Como se ha mencionado, para el óptimo aprovechamiento de los cortadores de Carburo de Tungsteno sólido, se requieren elevados avances y altas velocidades del husillo debido a su alto desempeño mientras que para el acero rápido el avance y la velocidad del husillo requeridos son mucho menores debido a que su desempeño es también menor.

También estos cálculos son desarrollados para los diferentes análisis realizados para determinar como varía el requerimiento de velocidad del husillo y el avance recomendado dependiendo de los diferentes procesos de corte que se pretende realizar.

4.4 PRESENTACION DE RESULTADOS.

Siguiendo la metodología anterior, se efectuó el análisis de diferentes cortadores verticales para diferentes condiciones de corte, generándose primero los modelos

geométricos para realizar después el análisis en MSC/Incheck y calcular con los resultados obtenidos el torque nominal necesario. Los resultados obtenidos se exponen a continuación.

4.4.1 Modelos geométricos y de simulación.

Siguiendo la metodología planteada, se presentan para los dos casos de estudio, las características principales de nuestros modelos simplificados son las siguientes:

Caso de estudio 1:

- Cortador vertical con un solo álabe de corte.
- El ángulo de espiral del álabe de corte es de 30° a partir del eje vertical de la herramienta, ya que este es el diseño mas empleado por diversos fabricantes de este tipo de herramientas.
- El cuerpo entero del cortador es generado como un sólido.
- Se generó un cortador con las mismas características anteriores, solamente que en diámetro de 1 pulg (25.4 mm).
- El espesor del alabe de corte es de 0.112 pulg (2.84mm).
- Se utiliza una longitud del zanco de 3 pulg (76.2mm) esta longitud de cortador son las que permanecen libres de sujeción en procesos de fresado comunes.

Caso de estudio 2:

- Cortador vertical con un solo álabe de corte.
- El ángulo de espiral del álabe de corte es de 30° a partir del eje vertical de la herramienta, ya que este es el diseño mas empleado por diversos fabricantes de este tipo de herramientas.
- El cuerpo entero del cortador es generado como un sólido.
- Se generó un cortador con las mismas características anteriores, solamente que en diámetro de ½ pulg (12.7 mm), ya que tanto este diámetro como el de 1 pulg son los diámetros para cortadores extensamente utilizados en la industria y que nos permiten hacer una comparación entre los resultados obtenidos.
- El espesor del alabe de corte es de 0.056 pulg (1.42mm).
- Se utiliza una longitud del zanco de 2 pulg (50.8mm) esta longitud de cortador es la que permanece libre de sujeción en procesos de fresado comunes.

Caso de estudio	Modelo de cortador	Diámetro primitivo (mm)	Altura del álabe (mm)	Angulo de hélice	Longitud (mm)
1	½ pulg (12.7 mm)	9.86	1.42	30°	50.8
2	1 pulg (25.4 mm)	19.72	2.84	30°	76.2

Tabla 4.1 Especificaciones de los modelos geométricos de cortadores verticales de 1 y ½ pulg.

Para generar los modelos de simulación, se ingresaron los datos correspondientes al tipo de material del cortador, la magnitud de las cargas (desplazamientos) y las restricciones

para después generar el mallado en los modelos geométricos. Una vez hecho esto, se efectúa el análisis (Tabla 4.2).

Caso de estudio	Modelo	Unidades	Material del cortador	Cargas (Desplazamientos)	Restricciones	Malla
1	Cortador de 1 pulg	Sistema Internacional (SI)	Acero Rápido (HSS)	Desbaste: 0.08mm	Anclaje en la parte superior del cortador	Elementos generados: 857 Nodos:1468
				Medio: 0.052mm		
				Acabado:0.015mm		
			Carburo de Tungsteno (WC)	Desbaste:-----		
				Medio: 0.052mm		
				Acabado:0.015mm		
2	Cortador de ½ pulg	Sistema Internacional (SI)	Acero Rápido (HSS)	Desbaste: 0.07mm	Anclaje en la parte superior del cortador	Elementos generados: 640 Nodos:1130
				Medio: 0.043mm		
				Acabado:0.013mm		
			Carburo de Tungsteno (WC)	Desbaste:-----		
				Medio: 0.043 mm		
				Acabado:0.013mm		

Tabla 4.2 Diferentes variables ingresadas en MSC/Incheck para los modelos. de 1 y ½ pulg.

Una vez ingresados los datos para la determinación de las fuerzas de reacción en los diferentes cortadores verticales utilizando como herramienta el sistema de elemento finito MSC/InCheck de Mechanical Desktop, se presentarán los resultados de los siguientes 2 casos analizados con sus correspondientes 5 variaciones:

Caso de estudio 1:

Para cortadores de 1 pulgada en Acero alta velocidad (HSS) y Carburo de Tungsteno (WC) 5 análisis con sus correspondientes desplazamientos: desbaste, medio maquinado y acabado.

Caso de estudio 2:

Para cortadores de ½ pulgada en Acero alta velocidad (HSS) y Carburo de Tungsteno (WC) 5 análisis con sus correspondientes desplazamientos: desbaste, medio maquinado y acabado.

Solamente se realizan 4 análisis para cortadores de Carburo de Tungsteno, ya que se omiten los procesos que implican obtener tolerancias correspondientes a desbaste. Esto debido a que el tipo de material de estos cortadores, no permitiría una flexión de esa magnitud sin fallar, sin embargo, aún cuando con cortadores de Carburo de Tungsteno se obtienen tolerancias correspondientes a un medio maquinado, su desempeño es superior al de un cortador de Acero de alta velocidad trabajando en operaciones de desbaste.

4.4.2 Esfuerzos resultantes.

Como se ha expuesto en la metodología, en MSC/InCheck obtenemos una pantalla donde se presenta la solución del modelo, dicha solución se visualiza por medio de un gráfico con una distribución de los esfuerzos por medio de colores, adjunto a él, una barra de colores donde a cada color se le asigna un valor diferente de los esfuerzos que se originaron en el material.

Tomando como referencia el modelo del cortador de 1 pulgada de Carburo de Tungsteno con desplazamiento de 0.052 mm (proceso para obtener una tolerancia de medio maquinado) se obtiene un gráfico de los esfuerzos como se muestran en la figura 4.4.

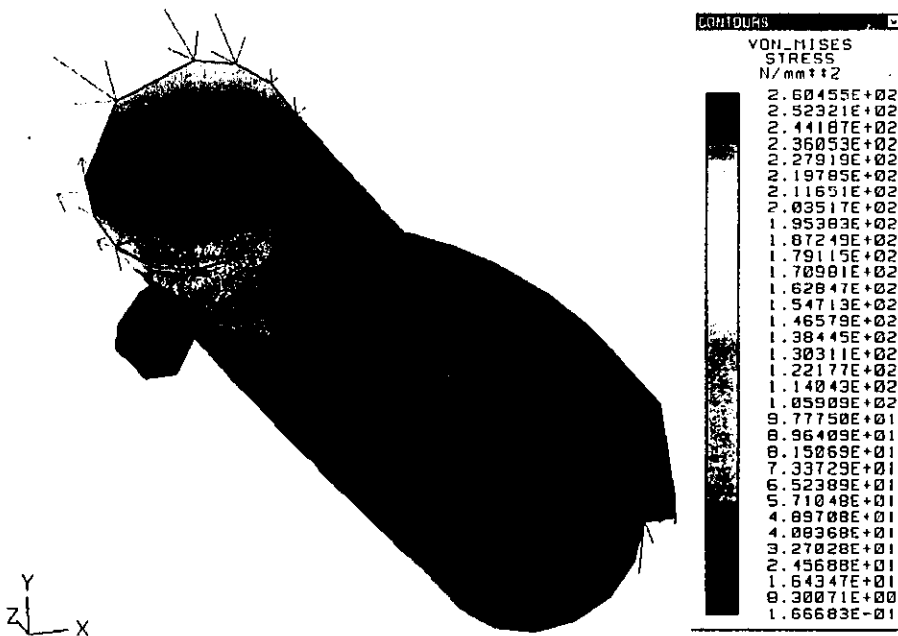


Figura 4.4 Ventana de representación de la distribución de esfuerzos para cortador de 1 pulgada de Carburo de tungsteno con desplazamiento de 0.052 mm (proceso para obtener una tolerancia de medio maquinado).

En esta imagen se observa la distribución de los esfuerzos, los cuales se presentan con base en la teoría de falla de Von Mises. El comportamiento de esta distribución es similar al que se puede presentar en una viga sometida a una carga en uno de sus extremos y un empotramiento en el otro, pero atendiendo las consideraciones que ya se han mencionado.

Cada uno de los esfuerzos son representados por diversos colores en el cortador, siendo para este caso el color rojo la zona de máximo esfuerzo a tensión, dicho esfuerzo se aprecia en la parte superior de la herramienta donde se uniría el cuerpo del cortador con el dispositivo de sujeción. Sobre el mismo plano superior pero del lado contrario a dicho esfuerzo se aprecia otra zona de color azul tenue junto a otra en verde, lo cual indica la presencia de esfuerzos de compresión. Existe una zona de color azul marino al centro de la herramienta donde el esfuerzo es prácticamente cero, marcando una zona de transición entre los esfuerzos de tensión y compresión.

En la parte inferior, se visualiza una pequeña zona con tono azul claro, la cual es debido a que esta es la zona de aplicación de la carga (desplazamiento), pero esto no implica que exista en realidad un esfuerzo en esa parte de la geometría del modelo.

Para el álabe o hélice del cortador, se observa que no hay una presencia de esfuerzos desde la parte inferior de la herramienta hasta la parte media de la misma, solo se observa un cambio de tonalidad en la zona de sujeción de la herramienta. Aquí es importante notar que prácticamente no se presentan esfuerzos a lo largo de todo el álabe de corte.

Haciendo referencia a la barra de colores, se determina que el valor máximo del esfuerzo para el cortador de Carburo de Tungsteno es de $2.60 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$, valor que se mantiene inferior al máximo esfuerzo de cedencia obtenido de las propiedades del material ($2 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$).

Para cada uno de los 10 casos realizados, se obtuvieron sus correspondientes ventanas de representación de esfuerzos para determinar si los valores de los esfuerzos a los que se someten los diferentes cortadores son mayores o menores al máximo esfuerzo de cedencia de los materiales. Esto para comprobar que sea válida la consideración de que los cortadores trabajarían sin fallar al ser utilizados en este tipo de procesos de corte.

Debido a que la herramienta tiene mayor desempeño en los procesos de desbaste es también cuando se generan mayores esfuerzos en el cuerpo de la herramienta.

Para ambos casos de estudio se presentan las siguientes ventanas de solución:

Caso de estudio 1:

1. Cortador de 1 pulg de Carburo de Tungsteno, proceso de medio maquinado (Fig. 4.4).
2. Cortador de 1 pulg de Acero alta velocidad, proceso de desbaste (Fig. 4.5).

Caso de estudio 2:

3. Cortador de ½ pulg de Carburo de Tungsteno, proceso de medio maquinado (Fig. 4.6).
4. Cortador de ½ pulg de Acero alta velocidad, proceso de desbaste (Fig. 4.7).



Figura 4.5 Ventana de representación de la distribución de esfuerzos para cortador de 1 pulg de Acero alta velocidad con desplazamiento de 0.08 mm (proceso de desbaste).

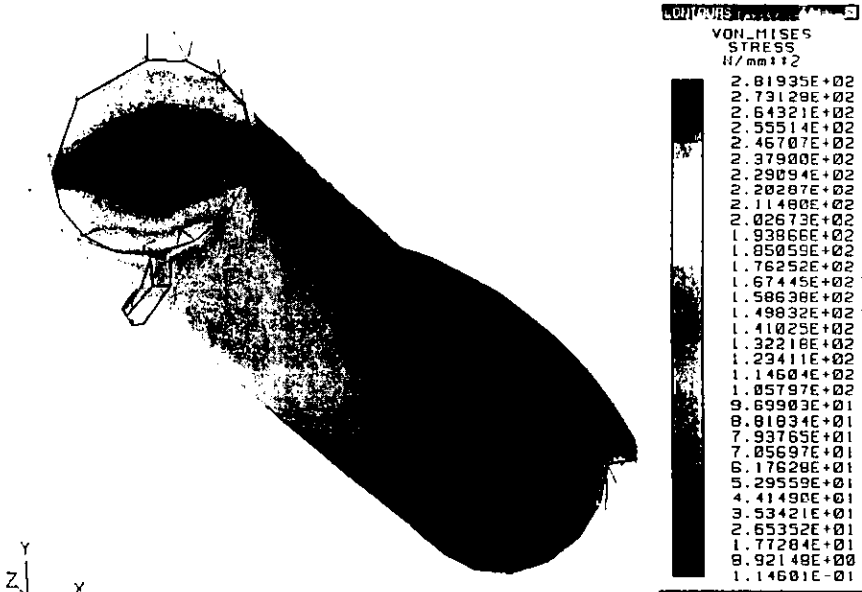


Figura 4.6 Ventana de representación de la distribución de esfuerzos para cortador de 1/2 pulg de Carburo de Tungsteno con desplazamiento de 0.045 mm (proceso de medio maquinado).



Figura 4.7 Ventana de representación de la distribución de esfuerzos para cortador de ½ pulg de Acero alta velocidad con desplazamiento de 0.07 mm (proceso de desbaste).

Observamos una distribución de esfuerzos similar a la presentada en cortador de 1" de carburo sólido con un desplazamiento de 0.052 mm, solo que los valores de los mismos varían para las diferentes situaciones de carga.

En la tabla 4.3 se comparan los valores de los máximos esfuerzos obtenidos al ingresar los diferentes desplazamientos correspondientes a los procesos de maquinado en MSC/Incheck y sus correspondientes valores de los esfuerzos de cedencia basados en las propiedades de los materiales de las herramientas.

Casos de estudio	Material del Cortador	Desplazamientos (mm)	Esfuerzo máximo (Von Mises) (N/mm ²)	Esfuerzo máximo de Cedencia (N/mm ²)
1: Cortador de 1 pulg.	Acero de alta velocidad (HSS)	Desbaste:0.08	1.4113x10 ²	8.43x10 ²
		Medio maq: 0.052	1.092x10 ²	
		Acabado: 0.015	3.151x10 ¹	
	Carburo de tungsteno (WC)	Medio maq: 0.052	2.6045x10 ²	2.00x10 ³
Acabado: 0.015	7.5131x10 ¹			
2: Cortador de ½ pulg.	Acero de alta velocidad (HSS)	Desbaste:0.07	2.11x10 ²	8.43x10 ²
		Medio maq. 0.043	1.1899x10 ²	
		Acabado: 0.013	3.4375x10 ¹	
	Carburo de tungsteno (WC)	Medio maq: 0.043	2.8193x10 ²	2.00x10 ³
Acabado: 0.013	8.1447x10 ¹			

Tabla 4.3 Tabla de comparación de los esfuerzos obtenidos y los esfuerzos de cedencia.

Se observa que los valores de los esfuerzos máximos asociados a sus desplazamientos, comparados con los esfuerzos de cedencia siempre son menores, por lo que se comprueba la consideración de que los cortadores no fallarán durante el proceso de corte.

De la experiencia en la utilización de este tipo de herramientas nos hemos percatado de la importancia de no sobrepasar los parámetros de corte que da el fabricante, aunque a su vez, se asegura que las herramientas son diseñadas con cierto factor de seguridad para evitar una falla inmediata durante una operación con parámetros erróneos. Ahora podemos comparar con este análisis, la diferencia entre los valores de los esfuerzos durante una operación adecuada y el valor máximo que podría soportar la herramienta.

4.4.3 Desplazamientos resultantes.

En MSC/InCheck obtenemos también una pantalla donde se visualiza por medio de un gráfico la distribución de los desplazamientos por medio de colores, adjunto a él. una barra de colores donde a cada color se le asigna un valor diferente de los desplazamientos que se originaron en el modelo.

Tomando como referencia el modelo del cortador de 1 pulgada de Carburo de Tungsteno se presenta la distribución de los desplazamientos tangenciales como se muestran en la figura 4.8.

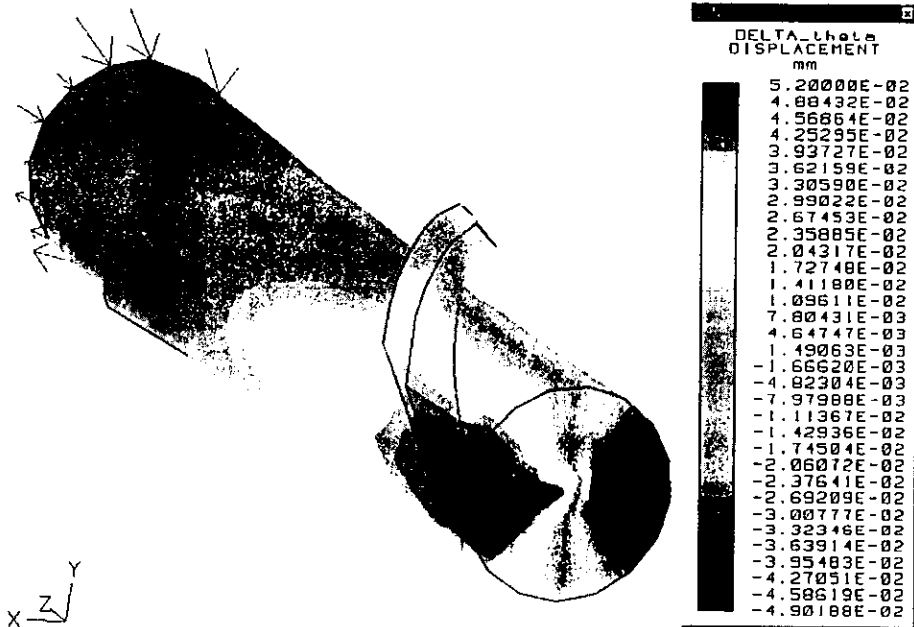


Figura 4.8 Ventana de representación de la distribución de desplazamientos para cortador de 1 pulgada de Carburo de tungsteno (proceso para obtener una tolerancia de medio maquinado).

En la figura 4.8 se muestra al cortador con una distribución de colores los cuales representan los desplazamientos tangenciales sobre él. Se observa que los máximos son en la parte inferior de la herramienta partiendo del centro hacia afuera. Haciendo referencia a la barra de colores que se presenta junto al modelo, vemos que el color rojo representa un desplazamiento positivo sobre el eje "Y", y su valor corresponde al ingresado para una condición de medio maquinado (0.052 mm). Al centro de la herramienta el color verde representa la transición de los desplazamientos en dirección positiva y negativa, comprobándolo en la barra de colores se advierte que dos valores semejantes presentan un cambio de signo. En forma casi simétrica al color rojo, la zona de color azul representa los desplazamientos en dirección "-Y".

En la zona de sujeción de la herramienta los desplazamientos son prácticamente nulos, esto es algo que se esperaba debido a que es ahí donde se colocaron las restricciones.

Longitudinalmente los desplazamientos se presentan en 2/3 de la pieza, siendo los mayores en la zona inferior del cortador (Fig. 4.9).

Al igual que los resultados de la distribución de los esfuerzos, los desplazamientos presentan una distribución similar para todos los casos, sólo que su magnitud cambia dependiendo de los valores ingresados.

Los resultados donde se presentan los desplazamientos de mayor magnitud, corresponden a los casos donde se obtuvieron los máximos esfuerzos. Estos fueron:

Caso de estudio 1:

5. Cortador de 1 pulg de Carburo de Tungsteno, proceso de medio maquinado (Fig. 4.8).
6. Cortador de 1 pulg de Acero alta velocidad, proceso de desbaste (Fig. 4.9).

Caso de estudio 2:

7. Cortador de ½ pulg de Carburo de Tungsteno, proceso de medio maquinado (Fig. 4.10).
8. Cortador de ½ pulg de Acero alta velocidad, proceso de desbaste (Fig. 4.11).

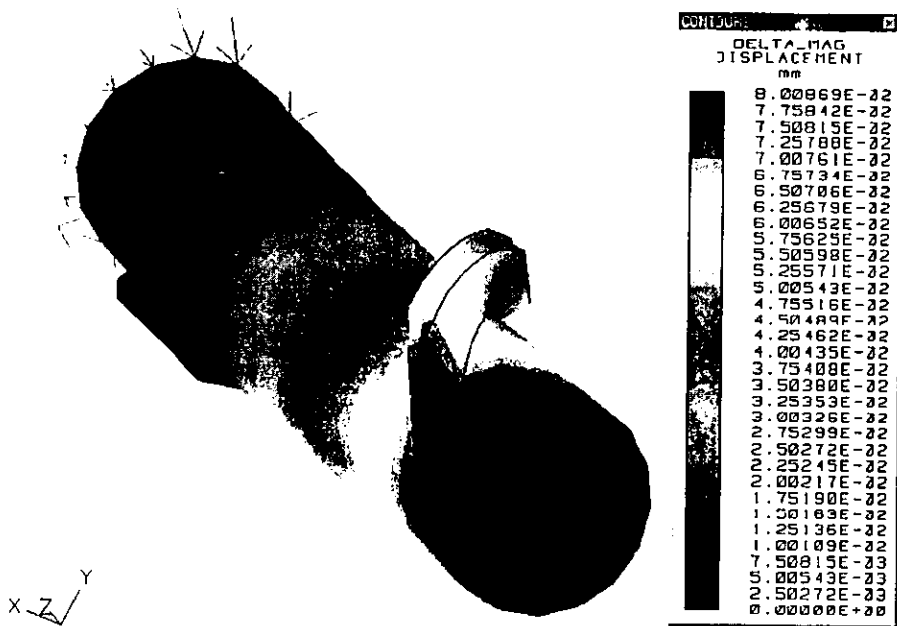


Figura 4.9 Ventana de representación de la distribución de desplazamientos totales para cortador de 1 pulgada de Acero de alta velocidad (proceso de desbaste).

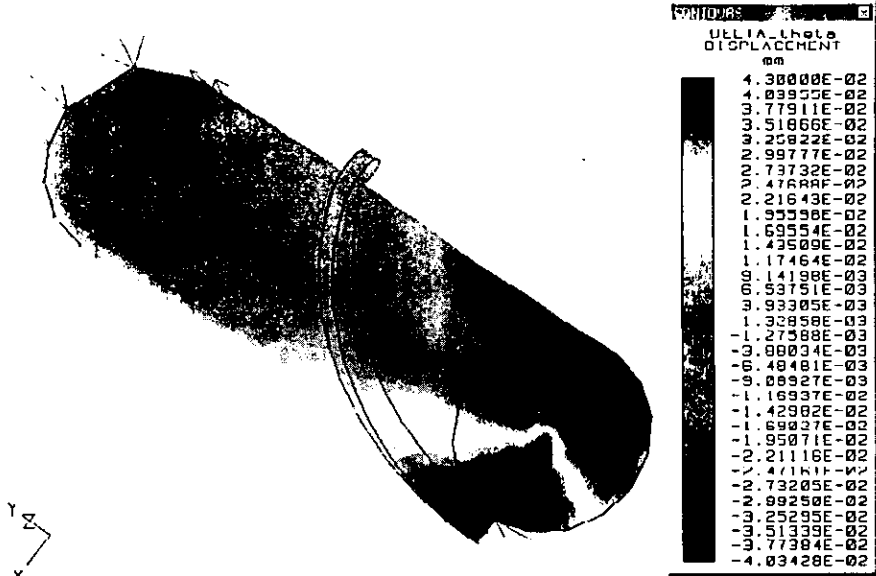


Figura 4.10 Ventana de representación de la distribución de desplazamientos para cortador de 1/2 pulg de Carburo de tungsteno (proceso para obtener una tolerancia de medio maquinado).

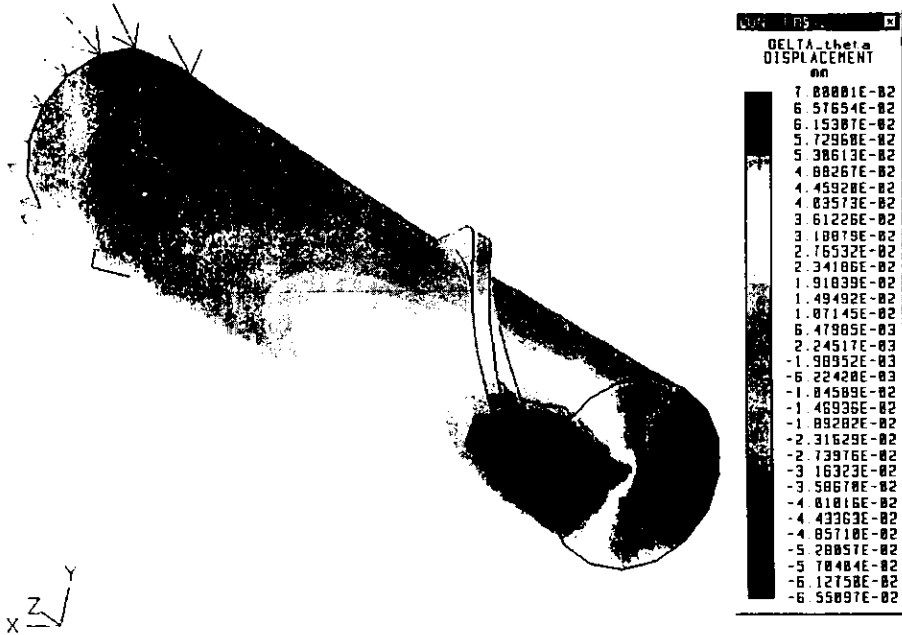


Figura 4.11 Ventana de representación de la distribución de desplazamientos para cortador de 1/2 pulg de Acero de alta velocidad (proceso de desbaste).

De las imágenes mostradas se observa claramente que en la zona donde existe un mayor desplazamiento corresponde a la zona del cortador donde se presentaron los menores esfuerzos y viceversa.

4.4.4 Fuerzas y torques resultantes.

Las fuerzas de reacción, su dirección y sentido, se representan gráficamente por flechas en la parte superior de la herramienta, lugar en donde se predeterminó su sujeción. Como ya se mencionó, solamente las componentes tangenciales de la fuerza de corte son las que debe vencer la potencia del husillo para efectuar el arranque de material de trabajo. Por tanto es necesario calcular el par asociado a la componente tangencial de la fuerza de reacción aplicada en cada nodo restringido y finalmente sumar todos los pares asociados a los nodos restringidos para obtener el torque total requerido en la máquina (Tabla 4.4).

Como ejemplo, para calcular el par total requerido en el caso de un cortador de 1 pulg de carburo sólido sometido a un desplazamiento correspondiente a un medio maquinado se utiliza la corrida de resultados obtenidos por NASTRAN:

```
*fem_results_data_on_nodes
REACTION_FORCE
  2   1   0   0   0
F
1 1 1
FORCE
Node:
 109
   Fr      Ft      Fz
 6.86541E+01 -6.50081E+00 2.98971E+02
 162
 1.12374E+02 -1.58592E+02 8.40214E+02
 164
 7.27719E+01 -4.01683E+01 7.42701E+02
 165
 -1.77318E+02 -1.11904E+02 1.09441E+03
 166
 -1.53216E+02 -3.68013E+01 4.19278E+02
 167
 1.10789E+01 -2.14667E+02 5.23419E+01
 169
 3.96955E+02 -5.78672E+01 -1.40490E+03
 170
 9.49984E+01 -2.64003E+02 -8.50527E+02
 171
 -7.41516E+01 -2.47346E+02 -9.96521E+02
```

```
172
-1.06796E+02 -7.06634E+01 -4.00142E+02
173
-1.51223E+02 -2.55540E+01 -5.03846E+02
192
-4.66519E+00 -5.90345E+01 0.00000E+00
*end
```

Para el cálculo del par:

$$T = r \times \Sigma Ft$$

Substituyendo:

$$T = 0.0127 \text{ m} (-6.50081\text{E}+00 -1.58592\text{E}+02 -4.01683\text{E}+01 -1.11904\text{E}+02 -3.68013\text{E}+01 - \\ 2.14667\text{E}+02 -5.78672\text{E}+01 \\ -2.64003\text{E}+02 -2.47346\text{E}+02 -7.06634\text{E}+01 -2.55540\text{E}+01 -5.90345\text{E}+01) \text{ N}$$

Finalmente:

$$T = 15.74 \text{ Nm}$$

Para calcular el valor del torque nominal de la máquina-herramienta para efectuar el proceso de corte:

$$T_n = T/\eta$$

Utilizando $\eta = 0.75$

$$T_n = 15.74 \text{ Nm} / 0.75$$

Finalmente:

$$T_n = 21.0 \text{ Nm}$$

A continuación se presentan los cálculos efectuados para 10 casos analizados, utilizando la corrida del análisis y diámetros de herramienta correspondientes:

Casos de estudio	Tipo de Maquinado	Acero Rápido (HSS)		Carburo de Tungsteno (WC)	
		Fuerza de reacción (N)	Torque nominal (Nm)	Fuerza de reacción (N)	Torque nominal (Nm)
1: Cortador 1 pulg.	Desbaste	1027.00	17.48	-----	-----
	Medio maquinado	526.71	8.96	1239.87	21.00
	Acabado	112.59	3.61	322.24	5.46
2: Cortador ½ pulg.	Desbaste	382.84	3.24	-----	-----
	Medio maquinado	215.34	1.81	720.05	6.10
	Acabado	62.18	0.46	208.09	1.76

Tabla 4.4 Tabla de comparación de las fuerzas de reacción obtenidos de MSC/Incheck y los torques nominales requeridos para los diferentes procesos de maquinado en los cortadores de 1 y ½ pulgada.

De la tabla 4.4 se observa que se mantiene una relación descendente entre cada una de los resultados, pues entre mayor sea el desplazamiento para la operación de maquinado, la fuerza de reacción es mayor y por consecuencia su torque.

Comparando los dos materiales de las herramientas y sus diferentes procesos de corte, se observa que las magnitudes de las fuerzas de reacción y los torques requeridos son 2 veces mayores para los carburos que para los Acero rápidos para el mismo proceso. Por ejemplo, para el cortador de 1 pulgada de carburo de tungsteno comparado con uno del mismo diámetro pero de Acero de alta velocidad, en un proceso de medio maquinado, los valores de sus torques difieren más de un 200%, esto significa que para un material más rígido la fuerza para lograr un desplazamiento igual al de un material más dúctil será mayor. Por lo cual, para una herramienta de Carburo de tungsteno la potencia requerida para flexionarla será mayor a la necesaria para flexionar una de Acero de alta velocidad.

De acuerdo a nuestra experiencia, los resultados calculados para el torque nominal requerido son muy similares a los que proporcionan maquinaria CNC de mediana producción o especial. Estas máquinas generalmente comprenden un rango de potencia de husillo de 5 a 10 HP y son empleadas típicamente en operaciones similares a los casos aquí presentados. Cabe mencionar que el torque proporcionado por la máquina disminuye conforme aumenta la velocidad de giro del husillo, por lo que es estrictamente necesario que la máquina pueda ser capaz de proporcionar el torque requerido a la velocidad del husillo que marquen los parámetros de corte (ver apéndice 2).

Podemos darnos cuenta de que en procesos que exigen más desempeño de la herramienta, como es el caso de un desbaste, en la mayor flexión que sufre la herramienta están implicadas grandes fuerzas de corte, lo que a su vez indica que el torque y potencia requeridas a la máquina-herramienta, serán también elevados. Es precisamente en este tipo de procesos que las máquinas para fresado son comparadas por su desempeño, ya que se busca siempre durante la producción, la mayor tasa de remoción posible.

Para el caso del acabado, la flexión y los esfuerzos en el cortador son menores, lo que implica que el torque y potencia requeridos son muy bajos, estos pueden disminuir aún más en casos donde el avance programado sea para prácticamente para “pulir” la pieza de trabajo. En estos casos extremos, la precisión que proporciona la máquina comenzará a ser el factor que determina la tolerancia obtenida en la pieza, ya que la flexión del cortador será despreciable.

4.4.5 Parámetros de corte.

Siguiendo con el ejemplo del cortador vertical con diámetro de 1 pulg en Carburo sólido que opera para obtener tolerancias de un medio maquinado, es necesario consultar los parámetros de corte que recomienda el fabricante para que la herramienta tenga su mejor desempeño en la operación que se pretende realizar en un material determinado.

En nuestro caso, el cortador vertical a utilizar es un cortador de 2 álabes de corte Ti-NAMITE de la firma SGS Tool Co. para el que se propone un corte de ranurado completo en un acero de medio carbono con dureza de 38 Rc:

De tablas del fabricante:

$$f_t = 0.00335 \text{ pulg/diente}$$
$$SFM = 492 \text{ ft/min}$$

De donde se obtienen los siguientes parámetros de corte:

$$N = 1800 \text{ rpm}$$
$$F = 10 \text{ pulg/min}$$

Por lo tanto, según los cálculos anteriores, es necesario que la máquina fresadora o el Centro de Maquinado tenga la capacidad para proporcionar como velocidad del husillo 1800 rpm cuando menos y pueda programarse un avance mínimamente de 10 pulg/min. Estos valores de las especificaciones de la máquina, junto con los obtenidos del valor del torque requerido, nos dan algunas características importantes para tomar una decisión en el proceso de selección de una máquina-herramienta CNC para fresado vertical. De acuerdo a las recomendaciones del fabricante de las herramientas de corte, para el proceso de desbaste de una ranura, donde el ancho de la misma corresponde al diámetro del cortador, sus parámetros de corte son los que se indican en la tabla 4.5.

Casos de estudio	Material	Tipo de proceso	Velocidad de corte (Vc) pies/min	Avance por diente (Ft) Pulg/diente	rpm	Avance (F) Pulg/min
1: Cortador 1 pulg.	Acero alta velocidad	Desbaste	78.72	0.003	290	2
		Medio	85.28	0.0026	320	1.5
		Acabado	92.15	0.0016	360	1.3
	Carburo de Tungsteno	Medio	492	0.00335	1800	10
		Acabado	656	0.0015	2040	5.25
2: Cortador ½ pulg.	Acero alta velocidad	Desbaste	59.04	0.0031	450	2.8
		Medio	65.6	0.0023	500	2.2
		Acabado	73.0	0.0016	550	1.8
	Carburo de Tungsteno	Medio	557.6	0.00145	4000	12
		Acabado	623.2	0.00045	4700	4.25

Tabla 4.5 Parámetros de corte recomendados para cortadores de 1 y ½ pulg para un proceso de ranurado completo.

Para un proceso de corte que sea al 50% del diámetro de la herramienta, sus parámetros de corte son los que se indican en la tabla 4.6.

Casos de estudio	Material	Tipo de proceso	Velocidad de corte (Vc) pies/min	Avance por diente (Ft) Pulg/diente	rpm	Avance (F) Pulg/min
1: Cortador 1 pulg.	Acero alta velocidad	Desbaste	78.72	0.003	290	2
		Medio	85.28	0.0026	320	1.5
		Acabado	92.15	0.0016	360	1.3
	Carburo de Tungsteno	Medio	492	0.005	1800	15
		Acabado	656	0.0022	2040	7.87
2: Cortador ½ pulg.	Acero alta velocidad	Desbaste	59.04	0.0031	450	2.8
		Medio	65.6	0.0023	500	2.2
		Acabado	73.0	0.0016	550	1.8
	Carburo de Tungsteno	Medio	557.6	0.0021	4000	18
		Acabado	623.2	0.00067	4700	6.37

Tabla 4.6 Tabla de parámetros de corte recomendados para cortadores de 1 y ½ pulg para un proceso de corte al 50% del diámetro de la herramienta.

Según las tablas 4.5 y 4.6, los parámetros de corte varían significativamente dependiendo del material de la herramienta, pues para las herramientas de Carburo de Tungsteno los avances y las velocidades de corte se incrementan alrededor de 3 a 5 veces en comparación a las del Acero de alta velocidad. Por ejemplo para los cortadores de 1 pulg de Carburo de Tungsteno al desempeñarse en un proceso de medio maquinado, el torque requerido es mayor al que requiere un cortador de Acero de alta velocidad. Para un material

duro como el Carburo de Tungsteno se necesitará mayor potencia para lograr una flexión que para un Acero rápido. Debido a que existe una relación directa entre la potencia requerida en un proceso y la tasa de remoción de material, el hecho de que se requiera mayor torque para lograr cierta flexión en un cortador de Carburo de Tungsteno que un cortador de Acero de alta velocidad, implica que la capacidad de remoción de material con herramientas de Carburo de Tungsteno es también mayor.

Los valores de los parámetros de corte seleccionados para el empleo de las herramientas de corte así como los torques requeridos que se han calculado son muy semejantes a los que se emplearon en experimentos de corte realizados en el centro de maquinado vertical EMCO VMC300 en el Laboratorio de Manufactura Avanzada de la Facultad de Ingeniería. En un trabajo de tesis se comprobó durante un procedimiento para determinar los parámetros óptimos durante el maquinado, que al aumentar la velocidad del husillo y el avance, llega un punto en que el torque que proporciona la máquina (ver apéndice 2), no es suficiente para efectuar el corte y se produce un atascamiento de la herramienta [23].

Por lo que, al igual que la velocidad del husillo, otros parámetros como el avance y el ancho de corte, determinan la tasa de remoción, la cual, es directamente proporcional al requerimiento de torque y potencia en la máquina, por esto se deben seleccionar tanto las herramientas como los parámetros óptimos para obtener el mayor desempeño de la máquina.

Conclusiones.

Con base en el objetivo planteado en esta tesis, las conclusiones que se obtienen son:

Se ha propuesto un método para la selección de máquinas-herramienta CNC para procesos de fresado vertical (Centros de maquinado o fresadoras CNC) proporcionando información fundamental que toma en cuenta las características más importantes de la máquina a considerar durante el proceso de selección, como lo son el torque y la potencia requerida, la configuración del diseño de la máquina, el tipo de control y los parámetros de corte como la velocidad del husillo o el avance de corte requeridos.

Una de las partes principales en esta tesis es el desarrollo de un método de análisis para determinar el torque requerido en cortadores verticales durante los procesos de fresado CNC sin la necesidad de efectuar pruebas físicas. Esto mediante el modelado, análisis y simulación de las condiciones de operación de cortadores verticales utilizando un sistema de solución por Elemento Finito.

De nuestra experiencia de estancia en plantas de fabricación de maquinaria CNC, sabemos que aún en máquinas que se prueban en ambientes controlados y que proporcionan una precisión del orden de 5 micras, la tolerancia obtenida en la pieza de trabajo al efectuarse un maquinado, depende del tipo de proceso realizado (desbaste, acabado, etc.). Esto debido a que dependiendo del tipo de proceso, varía la magnitud de la flexión que sufre la herramienta de corte. Esto fue simulado en el sistema, donde comprobamos que existe una relación directa entre la flexión del cortador y la fuerza de corte, obteniéndose las mayores valores de esta, en procesos de desbaste, que a su vez requieren un mayor torque de la máquina.

Se sabe que cuando un cortador vertical trabaja en condiciones que exceden los parámetros de corte recomendados, este fallará. Esta falla generalmente se produce en la zona superior del cuerpo del cortador, es decir, cerca del elemento de sujeción. Hemos comprobado mediante el sistema de análisis por elemento finito que es precisamente esta la zona de mayor esfuerzo en el modelo. También comprobamos que mientras la herramienta de corte trabaja bajo los parámetros recomendados, el valor del esfuerzo máximo obtenido en la solución del modelo será menor al esfuerzo de cedencia del cortador. Sabemos también que en este tipo de fallas, el filo en los álabes de corte no es dañado. Al realizar el análisis determinamos que debido a que a lo largo del álabe de corte, prácticamente no se

generan esfuerzos, la herramienta fallaría cerca de la zona de sujeción antes de que se generen esfuerzos considerables en esta zona. Por esto, si se presenta una fractura en un álabo de corte, sería consecuencia de un impacto o por utilizar la herramienta con parámetros de corte inadecuados.

Los parámetros de corte empleados en los cálculos de este trabajo, son tomados de las tablas que proporciona el fabricante, estos valores son presentados como un rango dentro del cual, se debe seleccionar el valor del parámetro de acuerdo a la experiencia. Por tanto, proponemos un trabajo alterno para cerrar el rango de selección; además de otro trabajo en que se realicen pruebas de corte. Para esto es necesario disponer de maquinaria con diferentes características y potencia para poder validar los resultados encontrados en el presente trabajo.

Consideramos que es justificada la utilización de un sistema de solución por elemento finito como el que hemos utilizado para una empresa dedicada a la consultoría y distribución de maquinaria, ya que además de sus ventajas, la inversión realizada (alrededor de \$ 5000.00 USD) resulta inferior a los gastos que genera una mala asesoría y selección. Como se mencionó, el 20 % del total de máquinas CNC vendidas por la empresa (con un total en 1998 de 35 máquinas) no han satisfecho completamente las necesidades de los clientes, lo cual ha ocasionado gastos considerables que van desde viajes del personal para asistencia técnica, hasta por devolución de maquinaria.

El haber desarrollado esta tesis fue una experiencia que nos aportó elementos importantes. Proponer la solución a un problema o necesidad y comprobarla haciendo uso del método científico, aplicando los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos, evaluando la factibilidad de la solución, sus ventajas y desventajas aplicando el criterio y la intuición, son algunos de ellos. También investigar, comprender, seleccionar, resumir y finalmente transportar información a un texto, son algunas de las habilidades que se desarrollan durante la elaboración de una tesis.

En nuestra opinión, la ingeniería mecánica, como ciencia aplicada, adquiere su verdadero sentido cuando se utiliza para proponer una solución a problemas como el presentado en esta tesis o cualquier otro trabajo. De ahí que consideramos de gran importancia, tener conocimientos sólidos tanto en ciencias básicas, como en ciencias de la ingeniería e ingeniería aplicada. No es posible pensar que un ingeniero se enfrente a un problema propio de su área, si no cuenta con los conocimientos suficientes y sabe aplicar estos conceptos para la correcta solución del problema.

Apéndice 1.

A continuación se presenta el listado de datos que genera MSC/Incheck y sus correspondientes archivo de resultados generados por MSC/NASTRAN para cada uno de los 10 análisis de los modelos de los cortadores:

En la lista de datos se incluye solamente los nodos restringidos, sus correspondientes coordenadas y el número total de nodos y elementos generados.

Lista de resultados incluye las componentes de las fuerzas de reacción en los nodos restringidos, así como el cálculo del par requerido para cada caso

LISTA DE NODOS RESTRINGIDOS, ASI COMO SUS CORRESPONDIENTES COORDENADAS PARA ANALISIS DE CORTADOR DE 1 PULGADA.

SE GENERARON 857 ELEMENTOS CON 1468 NODOS, CON TAMAÑO DE CADA ELEMENTO DE 70.9

```

$*** *RESTRAINT CASES
$*** *RESTRAINT CASE restrcmodell
$*** *SINGLE POINT CONSTRAINTS:
$*** *LENGTH BASE UNIT: millimeter
$*** *ANGULAR BASE UNIT: degree
SPC*          1          5          123
SPC*          1          19          123
SPC*          1          18          123
SPC*          1          17          123
SPC*          1          16          123
SPC*          1          15          123
SPC*          1          14          123
SPC*          1          13          123
SPC*          1          12          123
SPC*          1          11          123
SPC*          1          10          123
SPC*          1           9          123
SPC*          1           8          123
SPC*          1           7          123
$
GRID*          19          0 9.10945183E+000 3.77325950E+000
N001450
*N001450 1.06000000E+002          19
GRID*          18          0 6.97207155E+000 6.97207418E+000
N001451
*N001451 1.06000000E+002          18
  
```

GRID*	17	0	3.77325664E+000	9.10945302E+000
N001452				
*N001452	1.06000000E+002	17		
GRID*	16	0	-2.4780882E-006	9.86000000E+000
N001453				
*N001453	1.06000000E+002	16		
GRID*	15	0	-6.9731697E+000	6.97097585E+000
N001454				
*N001454	1.06000000E+002	15		
GRID*	14	0	-9.8599995E+000	-3.1000884E-003
N001455				
*N001455	1.06000000E+002	14		
GRID*	13	0	-9.1084136E+000	-3.7757652E+000
N001456				
*N001456	1.06000000E+002	13		
GRID*	12	0	-6.9704277E+000	-6.9737176E+000
N001457				
*N001457	1.06000000E+002	12		
GRID*	11	0	-3.7707519E+000	-9.1104901E+000
N001458				
*N001458	1.06000000E+002	11		
GRID*	10	0	3.09993327E-003	-9.8599995E+000
N001459				
*N001459	1.06000000E+002	10		
GRID*	9	0	3.77647974E+000	-9.1081173E+000
N001460				
*N001460	1.06000000E+002	9		
GRID*	8	0	6.97481135E+000	-6.9693333E+000
N001461				
*N001461	1.06000000E+002	8		
GRID*	7	0	9.11019319E+000	-3.7714692E+000
N001462				
*N001462	1.06000000E+002	7		
GRID*	6	0	1.26542708E+001	-1.0000000E+000
N001463				
*N001463	0.00000000E+000	6		
GRID*	5	0	9.86000000E+000	0.00000000E+000
N001464				
*N001464	1.06000000E+002	5		

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.08MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS)

REACTION FORCE				
	2	1	0	0
F				
1 1 1				
FORCE				
	5			
-2.70330E+01	1.05774E+02	-1.17653E+02		
	6			
-4.39361E+00	-5.55980E+01	0.00000E+00		
	7			
6.64923E+01	1.63684E+01	2.56407E+02		

```

      8
8.28757E+01 -1.52230E+01 2.83648E+02
      9
1.40765E+02 -1.77998E+02 8.10031E+02
     10
2.66431E+01 -6.37690E+01 5.75195E+02
     11
-1.50175E+02 -9.30168E+01 8.77876E+02
     12
-1.24285E+02 -4.42952E+01 3.60860E+02
     13
-2.38779E+02 1.01747E+02 5.11902E+02
     14
-1.11928E+01 2.12291E+02 9.72083E+01
     15
3.72787E+02 -5.25107E+01 -1.23950E+03
     16
6.82104E+01 -2.70808E+02 -8.18648E+02
     17
-5.06417E+01 -2.09174E+02 -8.77879E+02
     18
-7.77188E+01 -4.55801E+01 -2.76994E+02
     19
-1.33256E+02 8.09548E-01 -4.42455E+02
    1383
3.77303E+00 4.23776E+01 0.00000E+00
    1397
5.59278E+01 5.48605E+02 0.00000E+00
*end

```

Ft=1027.92N

Radio r=12.7mm

T= Ft*r T= (1027.92)(0.0127)

T= 13.11Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.052MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS)

```

REACTION FORCE
      2      1      0      0      0
F
1 1 1
FORCE
      5
-1.40571E+01 5.50023E+01 -6.11796E+01
      6
-2.28468E+00 -2.89109E+01 0.00000E+00
      7
3.45760E+01 8.51157E+00 1.33331E+02
      8
4.30954E+01 -7.91594E+00 1.47497E+02
      9

```

```

7.31978E+01 -9.25592E+01 4.21216E+02
10
1.38544E+01 -3.31599E+01 2.99102E+02
11
-7.80909E+01 -4.83687E+01 4.56496E+02
12
-6.46279E+01 -2.30335E+01 1.87647E+02
13
-1.24165E+02 5.29085E+01 2.66189E+02
14
-5.82024E+00 1.10392E+02 5.05483E+01
15
1.93849E+02 -2.73056E+01 -6.44539E+02
16
3.54694E+01 -1.40820E+02 -4.25697E+02
17
-2.63337E+01 -1.08770E+02 -4.56497E+02
18
-4.04137E+01 -2.37016E+01 -1.44037E+02
19
-6.92933E+01 4.20964E-01 -2.30077E+02
1383
1.96197E+00 2.20363E+01 0.00000E+00
1397
2.90825E+01 2.85275E+02 0.00000E+00
*end

```

Ft=526.71N

Radio r=12.7mm

T= Ft*r T= (526.71)(0.0127)
 T= 5.73Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.015MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS)

```

REACTION_FORCE
2            1            0            0            0
F
1 1 1
FORCE
5
-4.05494E+00 1.58661E+01 -1.76480E+01
6
-6.59042E-01 -8.33969E+00 0.00000E+00
7
9.97384E+00 2.45526E+00 3.84610E+01
8
1.24314E+01 -2.28345E+00 4.25471E+01
9
2.11148E+01 -2.66998E+01 1.21505E+02
10
3.99647E+00 -9.56535E+00 8.62793E+01
11

```



```

-2.25262E+01 -1.39525E+01  1.31681E+02
 12
-1.86427E+01 -6.64429E+00  5.41290E+01
 13
-3.58169E+01  1.52621E+01  7.67853E+01
 14
-1.67891E+00  3.18437E+01  1.45812E+01
 15
 5.59181E+01 -7.87660E+00 -1.85925E+02
 16
 1.02316E+01 -4.06212E+01 -1.22797E+02
 17
-7.59625E+00 -3.13761E+01 -1.31682E+02
 18
-1.16578E+01 -6.83701E+00 -4.15491E+01
 19
-1.99884E+01  1.21432E-01 -6.63683E+01
 1383
 5.65954E-01  6.35663E+00  0.00000E+00
 1397
 8.38918E+00  8.22908E+01  0.00000E+00
*end

```

Ft=112.59N

Radio r=12.7mm

T= Ft*r T= (112.59)(0.0127)

T= 2.71Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.052MM.

MATERIAL: CARBURO DE TUNGSTENO.

*fem_results_data_on_nodes

REACTION_FORCE

2 1 0 0 0

F

1 1 1

FORCE

109

-1.41452E+01 9.64671E+01 -1.02747E+02

136

6.27238E+01 6.15267E+02 0.00000E+00

161

6.86541E+01 -6.50081E+00 2.98971E+02

162

6.14869E+01 1.65152E+00 2.93492E+02

163

1.12374E+02 -1.58592E+02 8.40214E+02

164

7.27719E+01 -4.01683E+01 7.42701E+02

165

-1.77318E+02 -1.11904E+02 1.09441E+03

166

-1.53216E+02 -3.68013E+01 4.19278E+02

```

167
-2.04553E+02  9.39259E+01  5.17269E+02
168
1.10789E+01 -2.14667E+02  5.23419E+01
169
3.96955E+02 -5.78672E+01 -1.40490E+03
170
9.49984E+01 -2.64003E+02 -8.50527E+02
171
-7.41516E+01 -2.47346E+02 -9.96521E+02
172
-1.06796E+02 -7.06634E+01 -4.00142E+02
173
-1.51223E+02 -2.55540E+01 -5.03846E+02
192
-4.66519E+00 -5.90345E+01  0.00000E+00
1402
5.02650E+00  5.64562E+01  0.00000E+00
*end

```

Ft=1239.87N

Radio r=12.7mm

T= Ft*r T= (1239.87) (0.0127)

T= 15.74Nm

archivo: lplgacabwc

**RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.015MM.
MATERIAL: CARBURO DE TUNGSTENO.**

*fem_results_data_on_nodes

REACTION_FORCE

2 1 0 0 0

F

1 1 1

FORCE

```

109
-3.67775E+00  2.50815E+01 -2.67142E+01
136
1.63082E+01  1.59970E+02  0.00000E+00
161
1.78501E+01 -1.69021E+00  7.77325E+01
162
1.59866E+01  4.29396E-01  7.63079E+01
163
2.92172E+01 -4.12340E+01  2.18456E+02
164
1.89207E+01 -1.04438E+01  1.93102E+02
165
-4.61027E+01 -2.90951E+01  2.84548E+02
166
-3.98362E+01 -9.56833E+00  1.09012E+02
167

```


GRID*	432	0	4.55472592E+000	1.88662975E+000
N000699				
*N000699	5.30000000E+001	432		
GRID*	431	0	3.48603577E+000	3.48603709E+000
N000700				
*N000700	5.30000000E+001	431		
GRID*	430	0	1.88662832E+000	4.55472651E+000
N000701				
*N000701	5.30000000E+001	430		
GRID*	429	0	-1.2390441E-006	4.93000000E+000
N000702				
*N000702	5.30000000E+001	429		
GRID*	428	0	-3.4865848E+000	3.48548793E+000
N000703				
*N000703	5.30000000E+001	428		
GRID*	427	0	-4.9299998E+000	-1.5500442E-003
N000704				
*N000704	5.30000000E+001	427		
GRID*	426	0	-4.5542068E+000	-1.8878826E+000
N000705				
*N000705	5.30000000E+001	426		
GRID*	425	0	-3.4852139E+000	-3.4868588E+000
N000706				
*N000706	5.30000000E+001	425		
GRID*	424	0	-1.8853760E+000	-4.5552451E+000
N000707				
*N000707	5.30000000E+001	424		
GRID*	423	0	1.54996663E-003	-4.9299998E+000
N000708				
*N000708	5.30000000E+001	423		
GRID*	422	0	1.88823987E+000	-4.5540587E+000
N000709				
*N000709	5.30000000E+001	422		
GRID*	421	0	3.48740567E+000	-3.4846667E+000
N000710				
*N000710	5.30000000E+001	421		
GRID*	420	0	4.55509659E+000	-1.8857346E+000
N000711				
*N000711	5.30000000E+001	420		

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1/2 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.07MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS).

REACTION_FORCE

2 1 0 0 0

F

1 1 1

FORCE

351

4.60364E-01 5.17067E+00 0.00000E+00

378

2.19625E+01 2.15433E+02 0.00000E+00

381

-1.06471E+00 -1.34731E+01 0.00000E+00

382

```

-9.14251E+00  3.25085E+01  -3.02613E+01
  420
 3.66197E+01  1.66764E+01  1.02081E+02
  421
 3.48979E+01  -2.16765E+01  1.06808E+02
  422
 4.48878E+01  -5.84145E+01  3.12675E+02
  423
 4.34579E+00  -3.66954E+01  2.17294E+02
  424
-7.09949E+01  -6.74480E+01  3.53245E+02
  425
-5.16166E+01  5.59523E+00  1.64680E+02
  426
-6.34157E+01  4.42134E+01  1.70380E+02
  427
-2.92304E+00  6.07427E+01  2.01918E+01
  428
 1.51558E+02  -1.19146E+01  -4.75834E+02
  429
 2.41762E+01  -8.86820E+01  -2.82493E+02
  430
-1.76270E+01  -6.07999E+01  -3.36844E+02
  431
-3.58559E+01  -2.37878E+01  -1.37702E+02
  432
-6.62684E+01  2.55169E+00  -1.84220E+02
*end

```

Ft=382.84N

Radio r=6.35mm

T= Ft*r T= (382.84)(0.00635)
 T= 2.431Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1/2 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.043MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS).

REACTION_FORCE

	2	1	0	0	0
F					
1 1 1					
FORCE					
699					
-3.72760E+01	1.43533E+00	-1.03624E+02			
700					
-2.01690E+01	-1.33806E+01	-7.74571E+01			
701					
-9.91517E+00	-3.42000E+01	-1.89475E+02			
702					
1.35991E+01	-4.98836E+01	-1.58902E+02			
703					
8.52516E+01	-6.70196E+00	-2.67657E+02			
704					
-1.64421E+00	3.41678E+01	1.13579E+01			

```

705
-3.56713E+01  2.48701E+01  9.58386E+01
706
-2.90343E+01  3.14732E+00  9.26327E+01
707
-3.99346E+01  -3.79395E+01  1.98700E+02
708
2.44450E+00  -2.06411E+01  1.22228E+02
709
2.52494E+01  -3.28582E+01  1.75880E+02
710
1.96300E+01  -1.21930E+01  6.00793E+01
711
2.05986E+01  9.38045E+00  5.74206E+01
749
-5.14266E+00  1.82860E+01  -1.70220E+01
750
1.23539E+01  1.21181E+02  0.00000E+00
779
2.58954E-01  2.90850E+00  0.00000E+00
1078
-5.98898E-01  -7.57862E+00  0.00000E+00
*end

```

Ft=215.34N

Radio r=6.35mm

T= Ft*r T= (215.34) (0.00635)
 T= 1.3674Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1/2 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.013MM.

MATERIAL: ACERO ALTA VELOCIDAD (HSS).

REACTION_FORCE

 2 1 0 0 0

F
 1 1 1
 FORCE

```

699
-1.07686E+01  4.14650E-01  -2.99358E+01
700
-5.82659E+00  -3.86552E+00  -2.23765E+01
701
-2.86438E+00  -9.87999E+00  -5.47372E+01
702
3.92864E+00  -1.44108E+01  -4.59051E+01
703
2.46282E+01  -1.93612E+00  -7.73230E+01
704
-4.74994E-01  9.87069E+00  3.28116E+00
705
-1.03050E+01  7.18468E+00  2.76867E+01
706
-8.38770E+00  9.09225E-01  2.67606E+01
707

```

```

-1.15367E+01 -1.09603E+01  5.74023E+01
 708
 7.06190E-01 -5.96300E+00  3.53103E+01
 709
 7.29427E+00 -9.49235E+00  5.08097E+01
 710
 5.67090E+00 -3.52243E+00  1.73562E+01
 711
 5.95070E+00  2.70991E+00  1.65882E+01
 749
-1.48566E+00  5.28263E+00 -4.91745E+00
 750
 3.56890E+00  3.50079E+01  0.00000E+00
 779
 7.48091E-02  8.40234E-01  0.00000E+00
1078
-1.73015E-01 -2.18938E+00  0.00000E+00
*end

```

Ft=62.18N

Radio r=6.35mm

T= Ft*r T= (62.18)(0.00635)
 T= 0.3948Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1/2 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.043MM.

MATERIAL: CARBURO DE TUNGSTENO.

REACTION_FORCE

 2 1 0 0 0

F

1 1 1

FORCE

699

-7.52583E+01 -4.56709E+00 -2.31908E+02

700

-3.88958E+01 -2.86258E+01 -1.73877E+02

701

-1.78308E+01 -7.24800E+01 -4.30028E+02

702

2.97578E+01 -9.98109E+01 -3.55006E+02

703

1.71865E+02 -1.82608E+01 -6.02899E+02

704

-4.40948E+00 6.85118E+01 2.54071E+01

705

-7.32849E+01 4.55287E+01 2.16192E+02

706

-5.75429E+01 9.35467E+00 2.10516E+02

707

-8.41626E+01 -7.53757E+01 4.46352E+02

```

708
5.65652E+00 -3.88347E+01 2.72574E+02
709
4.79073E+01 -6.63873E+01 3.94679E+02
710
3.93117E+01 -2.77623E+01 1.35283E+02
711
3.82691E+01 1.25238E+01 1.30252E+02
749
-8.38280E+00 3.41558E+01 -3.75357E+01
753
2.76884E+01 -2.71600E+02 0.00000E+00
780
6.06385E-01 6.81074E+00 0.00000E+00
1078
-1.29447E+00 -1.63806E+01 0.00000E+00
*end

```

Ft=720N

Radio r=6.35mm

T= Ft*r T= (720) (0.00635)

T= 4.57Nm

RESULTADOS PARA CORTADOR VERTICAL DE 1/2 PULG. CON DESPLAZAMIENTO DE 0.013MM.

MATERIAL: CARBURO DE TUNGSTENO.

```

REACTION FORCE
      2      1      0      0      0
F
1 1 1
FORCE
699
-2.17413E+01 -1.31938E+00 -6.69956E+01
700
-1.12366E+01 -8.26968E+00 -5.02311E+01
701
-5.15112E+00 -2.09387E+01 -1.24230E+02
702
8.59671E+00 -2.88343E+01 -1.02557E+02
703
4.96499E+01 -5.27534E+00 -1.74171E+02
704
-1.27385E+00 1.97923E+01 7.33982E+00
705
-2.11712E+01 1.31527E+01 6.24554E+01
706
-1.66235E+01 2.70246E+00 6.08157E+01
707
-2.43136E+01 -2.17752E+01 1.28946E+02
708
1.63411E+00 -1.12189E+01 7.87436E+01
709
1.38399E+01 -1.91786E+01 1.14018E+02
710
1.13567E+01 -8.02022E+00 3.90816E+01

```



```

711
1.10555E+01  3.61798E+00  3.76284E+01
749
-2.42170E+00  9.86722E+00 -1.08436E+01
753
7.99887E+00 -7.84622E+01  0.00000E+00
780
1.75178E-01  1.96755E+00  0.00000E+00
1078
-3.73958E-01 -4.73217E+00  0.00000E+00
+end

```

Ft=208N

Radio r=6.35mm

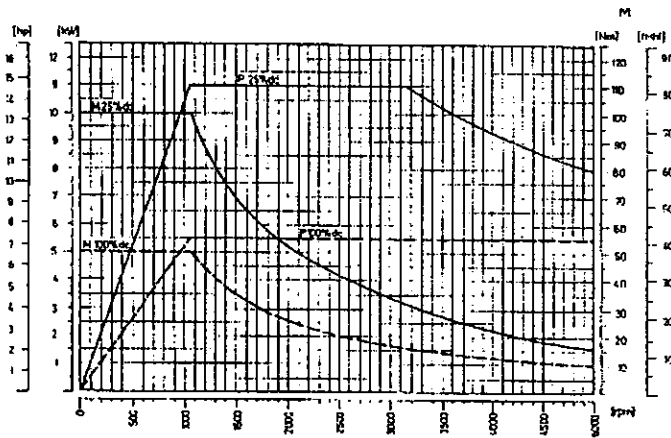
T= Ft*r T= (208)(0.00635)

T= 1.32Nm

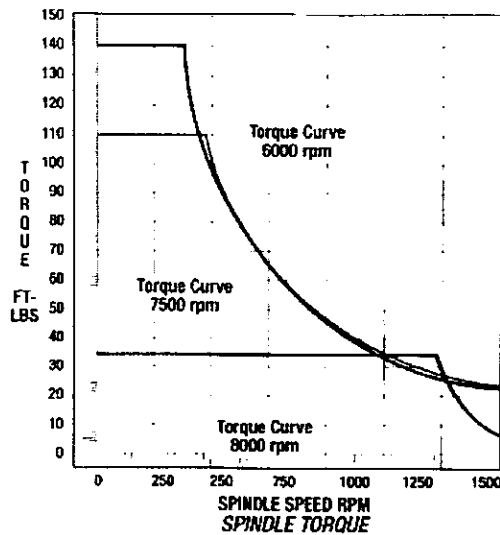
Apéndice 2.

Gráficas de Torque vs Velocidad de algunos de los modelos de Máquinas-herramienta CNC comerciales

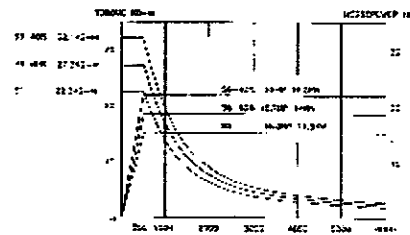
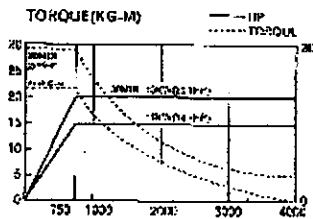
Para cada una de estas gráficas, se observa que el torque proporcionado por la máquina disminuye conforme aumenta la velocidad de giro del husillo. De lo expuesto en capítulos anteriores, es estrictamente necesario que la máquina pueda ser capaz de proporcionar el torque requerido a la velocidad del husillo.



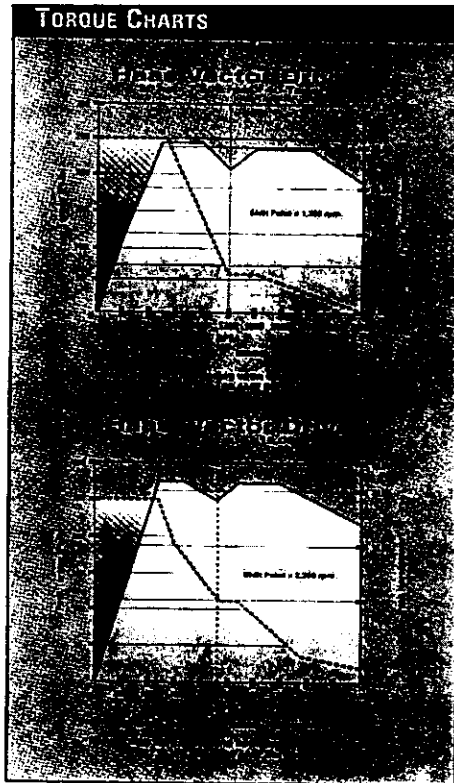
Gráfica de Torque vs velocidad para Centro de maquinado CNC EMCO VMC 300. Potencia del motor principal: 5.5-11 kW.



Gráfica de comparación de Torque vs velocidad para Centro de maquinado Bridgeport Discovery, Torq-Cut TCI Potencia del motor principal: 9.5 HP.



Gráfica de Torque vs velocidad para Centros de maquinado ACRA con potencia del motor principal de 11 y 15 kW.



Gráfica de Torque vs velocidad para Centros de maquinado HAAS con potencia del motor principal de 20 y 30 HP.

Bibliografía.

1. Korem Yoran, Control of manufacturing systems, United States 1983, Mc Graw Hill
2. Valentino James, Introduction to computer Numerical control, United States 1993, Prentice Hall
3. Pollack Herman, Computer numerical control, United States 1990, Prentice Hall
4. Juneja B.L., Fundamentals of metal cutting and machine tools, New York, USA 1987, Edit John Wiley & Sons
5. Doyle Laurence, Procesos y materiales de manufactura para ingenieros, 3ª edición, México 1988, Prentice Hall.
6. Krar S.F., Operación de máquinas herramientas, México 1984, Mc Graw Hill
7. Máquinas herramienta 1, Formación profesional y cultural técnica, Industria/metalmecánica, Barcelona, España, Ed. Gustavo Gili, S.A.
8. El mecanizado moderno, Manual práctico, Sandvik Coromant, Suecia 1994, Ed. Departamento de ediciones técnicas
9. Metals handbook, ninth edition, volume 3, Properties and selection stainless steels, tool materials and special-purpose metals, American Society for metals 1980
10. Armarego E.J., The machining of metals, United States 1969, Prentice Hall
11. Chevalier H. Dibujo industrial, 2ª edición, México 1992, UTHEA
12. Malvern, Lawrence, Introduction to the Mechanics of a continous medium, United States 1969, Prentice Hall
13. Levi Enzo, Elementos de mecánica del medio continuo, México 1971, editorial Limusa-Wiley, S.A.
14. Dieter George, Mechanical Metallurgy, London 1988, Mc Graw Hill.

15. Ugural A.C. Advanced Strength and applied elasticity, New York, Amsterdan, Oxford, 1984. Ed. Elsevier
16. Chandrupatla Tiupathi, Introduction to finite elements in Engineering, Englewwwod Cliffs, New Jersey 1991, Prentice Hall.
17. Solid carbide tools SGS Catalog, SGS Tool Company, United States 1997
18. Vertical Machining Centers Catalog, Haas Automation, Inc. United States 1998.
19. The TORQ-CUT series of VMC's Catalog, Bridgeport Machines. Inc, United States 1998
20. Large vertical Machining Center Catalog, ACRA Machinery, Inc, United States 1998
21. Catálogo de máquinas-herramienta. Asociación Española de Fabricantes de Máquinas-herramienta, San Sebastián, España 1998.
22. ISCAR plus line catalog, ISCAR LTD, Israel 1996.
23. González Vargas M. A., Vázquez Huarota V. M. Tesis: Determinación de Parámetros de corte óptimos para equipo de control numérico. UNAM. Facultad de Ingeniería, México 1993.
24. MSC Page.:
<http://www.macsch.com/msc>
25. NASTRAN:
<http://http.ecn.bgu.edu/users/xwww/ecn/users.guide/unix/nastran.shtml>
26. Información de productos de CAD/CAM
<http://users.neca.com/wahoo/camindx.html>
27. Bridgeport Machines, Inc.
<http://www.bpt.com>

Referencias.

- A. Korem Yoran, Control of manufacturing systems, United States 1983, Mc Graw Hill
- B. Valentino James, Introduction to computer Numerical control, United States 1993,
- C. El mecanizado moderno, Manual práctico, Sandvik Coromant, Suecia 1994, Ed. Departamento de ediciones técnicas
- D. Juneja B.L., Fundamentals of metal cutting and machine tools, New York, USA 1987, Edit John Wiley & Sons
- E. Armarego E.J., The machining of metals, United States 1969, Prentice Hall
- F. Ugural A.C. Advanced Strength and applied elasticity, New York, Amsterdam, Oxford, 1984, Ed. Elsevier
- G. Malvern, Lawrence, Introduction to the Mechanics of a continuous medium, United States 1969, Prentice Hall
- H. Chevalier H. Dibujo industrial, 2ª edición, México 1992, UTHEA
- I. Chandrupatla Tiupathi, Introduction to finite elements in Engineering, Englewwwod Cliffs, New Jersey 1991, Prentice Hall.