

UNIVERSIDAD AUTONÓMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN AUTOMÁTICO
PARA CORTADORES APLICADO EN TORNO CNC”**

T E S I S

que presenta para obtener el grado de Maestro en Ciencias

MARTHA PATRICIA GUZMÁN HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. Víctor Nuño Moreno

Mexicali, B. C

13 de Enero del 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

MAESTRÍA EN CIENCIAS E INGENIERÍA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMPENSACIÓN
AUTOMÁTICO PARA CORTADORES APLICADO EN
TORNO CNC”**

DIRECTOR DE TESIS: DR. VÍCTOR NUÑO MORENO

TESISTA: ING. MARTHA PATRICIA GUZMÁN HERNÁNDEZ



Dedicatoria

A todas esas personas que directa e indirectamente hicieron posible este trabajo, como lo son maestros, amigos y familiares.

Gracias a todos y cada uno de ellos



Agradecimientos

Un especial agradecimiento al CONACYT que me brindó el apoyo económico para la realización de este proyecto, ya que sin esta ayuda sería difícil haber concluido la maestría.

También a mi director de tesis el Dr. Víctor Nuño Moreno por haberme aceptado como su estudiante y porque con sus comentarios siempre acertados, interés y disposición de tiempo me fue llevando al camino correcto de la tesis.



Índice de contenido

Índice de figuras	IV
Resumen	VI
Abstract	VII
Tema:	VIII
Metas:.....	VIII
Objetivo:	VIII
Hipótesis:.....	VIII
Justificación:	IX
Introducción	X
Capítulo I.- Estado del arte	
1.1.- Antecedentes de las herramientas de corte	2
1.2.- Insertos.....	4
1.2.1.- Forma de los insertos y radio de la punta.....	5
1.2.2.- Geometría de corte.	6
1.2.2.1.- Insertos negativos.	6
1.2.2.2.- Insertos positivos.	7
1.3.- Teoría de Taylor	8
1.4.- Desgaste de la herramienta.....	10
1.4.1.- Tipos de desgaste.....	10
1.4.1.1.-Desgaste de flanco	11
1.4.1.2.- Craterización	11
1.4.1.3.- Deformación plástica.....	12
1.4.1.4.- Fisuras térmicas.....	12
1.4.1.5.- Fractura.....	13
1.4.2.- Mecanismos de desgaste	13
1.4.2.1.- Desgaste por abrasión	14
1.4.2.2.- Desgaste por difusión.....	14
1.4.2.3.- Desgaste por oxidación.....	14
1.4.2.4.- Desgaste por fatiga	14
1.4.2.5.- Desgaste por adhesión	15
1.5.- Sistemas de compensación de herramientas.....	15
1.5.1.- Sistema de compensación de desgaste de la herramienta.	15



1.5.2.- Método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte basado en un sensor de proximidad de fibra óptica.....	16
1.5.3.- Compensación en tiempo real del desgaste de la herramienta en fresado por descarga eléctrica.	16
1.5.4.- Efecto de la compensación del desgaste de la herramienta bajo control de tolerancias secuenciales.	17
Capítulo II.- Marco Teórico	
2.1.- Teoría de corte	19
2.1.1.- Formación de viruta	19
2.1.1.1. - Viruta discontinua.....	20
2.1.1.2. - Viruta continua	20
2.1.1.3. - Viruta continua con el borde acumulado.....	21
2.1.2.- Ángulos.....	22
2.1.3.- Fuerzas de corte	24
2.1.3.1.- Corte ortogonal	25
2.1.3.2.- Corte oblicuo	28
2.1.4.- Velocidades	29
2.1.5.- Materiales	30
2.1.5.1.- Aceros de alta velocidad	31
2.1.5.2.- Carburos Cementados	32
2.1.5.3.- Recubrimientos	33
2.2.- Máquinas-herramienta de corte	34
2.2.1 Máquina fresadora:	35
2.2.1.1.- Fresadoras horizontales.....	36
2.2.1.2.- Fresadoras universales.....	37
2.2.1.3.- Fresadoras verticales.....	38
2.2.2.- Cepillo de codo	38
2.2.3.- Torno	40
2.2.3.1. - Torno CNC.....	42
2.3.- Maquinaria automatizada.....	43
2.3.1.- Máquina de electroerosión.....	44
2.3.1.1.- Máquina de electroerosión con alambre.....	46
2.3.2.- Máquina de rayo láser.....	47
2.3.3.- Máquina de chorro de agua	48
2.4.- Optimización de procesos de corte	49
Capítulo III.- Desarrollo experimental	



3.1.- Desarrollo experimental	53
3.1.1.- Variables a considerar	54
3.2.- Determinación del proceso a través de un diseño experimental	55
3.2.1.- Factoriales	56
3.2.2.- Taguchi.....	56
3.2.3.- Superficie de respuesta	57
3.3.- Operación de la CNC.....	58
3.3.1.- Sistema de coordenadas y ejes de la máquina CNC.	69
3.4.- Programación de la CNC	70
3.4.1.- Antecedentes de la programación.....	71
3.4.2.- Códigos "G"	74
3.4.3.- Códigos "M"	77
3.5.- Maquinado de la CNC.....	79
3.5.1.- Tipos de maquinado	80
3.6.- Creación del algoritmo de control CNC-GM	82
3.6.1.- Subprogramas	84
3.6.2.- Subrutinas.....	85
3.6.3.- Macros	86
3.7.- Metrología.....	87
3.7.1.- Instrumentos de medición	89
3.7.2.- Exactitud y precisión	89
3.7.3.- Micrómetros para diámetros externos	90
3.7.4- Especificaciones de los insertos	91
3.7.5- Corridas de prueba	92
3.8.- Verificado dimensional.....	93
3.9.- Graficado de la curva primaria	94
3.9.1.- Ajuste de curva	97
Capítulo IV.- Resultados y conclusiones	
4.1.- Resultados.....	99
4.2.- Conclusiones	102



Índice de figuras

Figura 1. 1 Formas de insertos	6
Figura 1. 2 y 1.3 Inserto negativo e Inserto positivo	7
Figura 1. 4 Desgaste de flanco	11
Figura 1. 5 Craterización.....	11
Figura 1. 6 Deformación plástica	12
Figura 1. 7 Fisuras térmicas.....	12
Figura 1. 8 Fractura	13
Figura 1. 9 Mecanismos de desgaste	13
Figura 2. 1 Tipos de virutas; a) virutas discontinuas, b) virutas continuas y c) virutas con el borde acumulado.	21
Figura 2. 2 Ángulos y claros en una herramienta de corte para torno	22
Figura 2. 3 Ángulos y claros en cortadores (otra perspectiva).....	23
Figura 2. 4 Modelo de corte ortogonal	25
Figura 2. 5 Diagrama de cuerpo libre en la viruta.....	26
Figura 2. 6 Fuerzas de corte	27
Figura 2. 7 Corte oblicuo.....	28
Figura 2. 8 Tiempo relativo de maquinar con diversos materiales de herramienta.	34
Figura 2. 9 Clasificación de las máquinas-herramienta de corte.	35
Figura 2. 10 Operación simple de fresado	35
Figura 2. 11 Fresadora universal	37
Figura 2. 12 Herramientas de corte para cepillos.....	39
Figura 2. 13 Portaherramientas	40
Figura 2.14 Partes del torno; a) bancada, b) cabezal, c) contrapunto, d) carro y e) portaherramientas.....	42
Figura 2. 15 Torno con control Numérico	43
Figura 2. 16 Esquema del proceso de electroerosión	45
Figura 2. 17 Esquema del proceso de electroerosión con alambre	47
Figura 2. 18 Esquema del proceso de maquinado con láser.....	48
Figura 2. 19 Esquema del proceso de maquinado con chorro de agua.....	49



Figura 2. 20 Ejemplo de maquinado de piezas	51
Figura 2. 21 Ejemplo de maquinado de barreno.	51
Figura 3. 1 Esquema de la pantalla dividida en 8 secciones	58
Figura 3. 2 Ejes de la CNC	69
Figura 3. 3 Máquina CNC	70
Figura 3. 4 Operaciones de torneado.....	80
Figura 3. 5 Pieza a medir	89
Figura 3. 6 Micrómetro digital con tope en V	90
Figura 3. 7 Gráfica con alimentación y profundidad de corte.....	91
Figura 3. 8 Condiciones para cada tipo de pastilla.....	91
Figura 3. 9 Especificaciones de las pastillas	91
Figura 3. 10 Proceso de maquinado	92
Figura 3. 11 Inserto 1025	94
Figura 3. 12 Inserto 2015	95
Figura 3. 13 Inserto 2025	95
Figura 3. 14 Condensado de gráficas	96
Figura 3. 15 Gráfica con línea ajustada	97
Figura 3. 16 Diagrama de flujo	99
Figura 3. 17 Curva ajustada.....	101



Resumen

Las máquinas de control numérico ofrecen posibilidades de maquinados complejos a altas velocidades de corte, para ello se tiene el herramental necesario, dentro de este se encuentran los cortadores, los cuales tienen una vida útil muy limitada.

Actualmente el amplio uso de cortadores con insertos, obliga a la optimización de su uso para incrementar su vida, siguiendo las recomendaciones de velocidad, profundidad y el tipo de proceso de corte indicadas por el fabricante.

En el presente trabajo se presenta un proyecto de compensación automática en función de curvas de desgaste, bajo condiciones de control sobre las variables involucradas, como lo son el tipo de corte, las RPM, las profundidades y velocidad de alimentación para un torno CNC.

La propuesta del modelo de compensación automática se fundamenta sobre un algoritmo de control, ofreciendo la posibilidad de incrementar el tiempo de vida de una herramienta de corte sin la necesidad de realizar paro de máquina y tiempos adicionales de ajuste y posicionamiento.



Abstract

CNC machines offer the potential for complex machining at high cutting speeds, so it is necessary to have the proper tooling, within this are the cutters, which have a limited useful life.

Currently, the widespread use of cutters with inserts, requires the optimization of its use to increase their life, following the recommendations of speed, depth and type of cutting process indicated by the manufacturer.

This paper presents a proposed automatic compensation based on wear curves under control conditions on the variables involved, such as the type of cut, RPM, depths and feed rate to a CNC lathe.

The proposed model is based on automatic compensation control algorithm, offering the possibility of increasing the lifetime of a cutting tool without the need for standstill and additional time for a adjustment and positioning.



Tema:

“Diseño de un sistema de compensación automático para cortadores aplicado en torno CNC”

Metas:

- Hacer programa para maquinado de piezas
- Maquinar y medir piezas
- Realizar gráfica y ajuste de la curva
- Modificar programa de tal forma que realice la compensación de herramienta

Objetivo:

Crear un algoritmo de control computarizado que logre compensar automáticamente el desgaste de herramientas para procesos de corte convencional en maquinaria tipo torno CNC, optimizando el desempeño de la herramienta y disminuyendo el tiempo de ciclo de lote por cambio de herramienta.

Hipótesis:

Por medio de las curvas de desgaste de herramientas de acero de alta velocidad se realizará un sistema automatizado de compensación el cual será verificado dimensionalmente para obtener la desviación con respecto al valor objetivo.



Justificación:

La industria metalmecánica moderna se fundamenta en operaciones de maquinado de precisión que trabajan a altas velocidades de corte, reduciendo el tiempo de ciclo y en donde se evidencia la reducción de producto defectuoso y a costos mínimos.

Es así que la propuesta de un modelo de compensación automática de la herramienta incrementará aún más la optimización del proceso de fabricación, beneficiando a aquellas empresas que utilizan maquinarias automatizadas de tipo torno CNC y necesiten minimizar tiempos por cambio de herramienta y optimizar el uso de las mismas.



Introducción

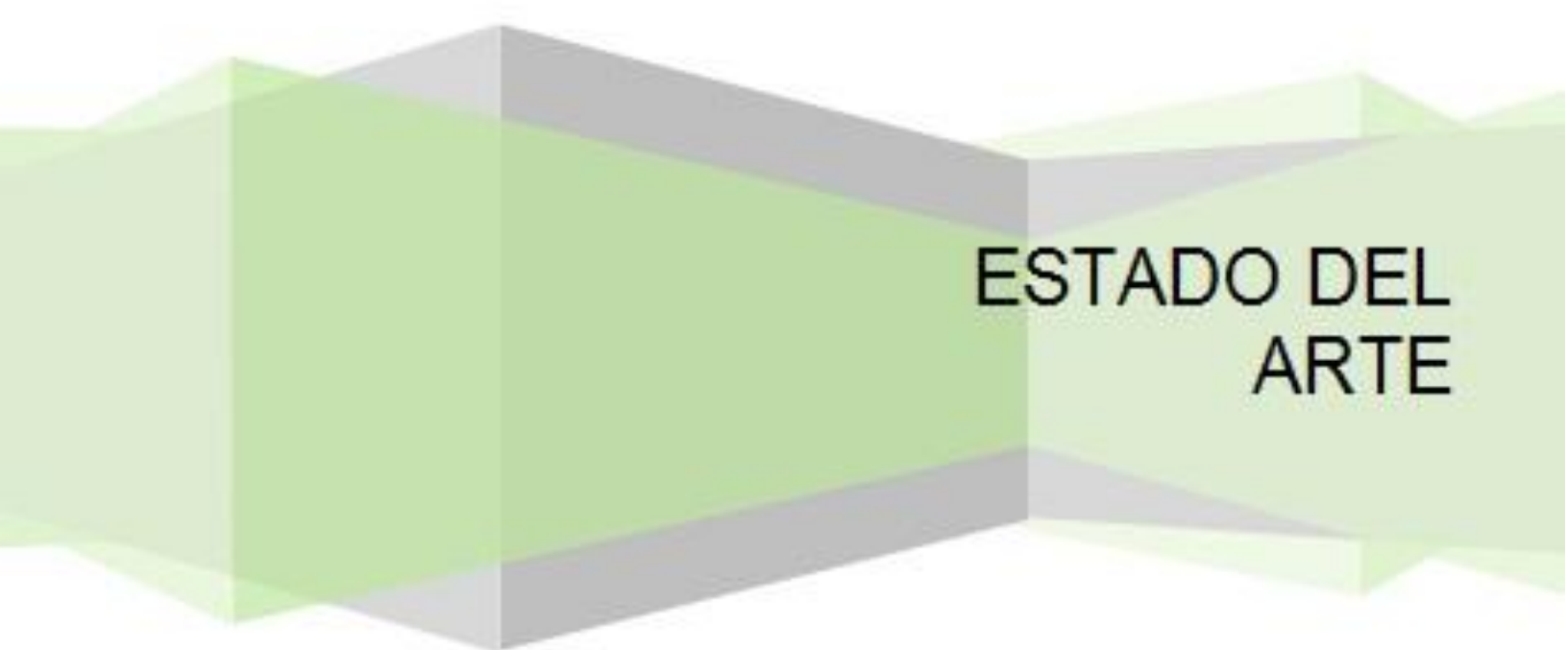
Debido a las grandes demandas de productos manufacturados con acabados de mayor calidad, tolerancias pequeñas y menores costos, es de vital importancia hacer énfasis en los procesos de maquinado.

Existen diversos factores que se pueden controlar para poder satisfacer las demandas requeridas, entre ellos se encuentra el desgaste de la herramienta de corte, el cual actualmente representa un reto para la industria, ya que, aunque existen sistemas desarrollados y se emplean en la práctica, todavía no se han podido cumplir con todas las exigencias que se demandan.

El trabajo presentado en este documento propone un sistema de control computarizado que logre compensar automáticamente el desgaste de herramientas para procesos de corte convencional en maquinaria tipo torno CNC, en base a curvas de desgaste realizadas mediante experimentos con herramientas de acero de alta velocidad.

El método que se plantea llevaría a cabo la compensación automática de la herramienta disminuyendo así el tiempo de proceso de maquinado debido a que se ahorraría tiempo en su cambio y se aprovecharía al máximo la vida útil de esta.

CAPÍTULO I



ESTADO DEL
ARTE



1.1.- Antecedentes de las herramientas de corte

El corte o remoción de material se llama maquinado o proceso de maquinado en la manufactura. “Maquinado” es el proceso en el cual se cambian el tamaño, forma o acabado de un material para tener un producto industrial para el consumidor. La remoción de material se efectúa a mano o con máquinas, con el uso de movimientos de corte. [1]

El mecanizado (maquinado) de materiales ha tomado auge progresivamente desde un poco antes que la revolución industrial en el siglo dieciocho y diecinueve, verdaderamente acelerado en el diecinueve.

El proceso de corte de metal ha jugado un rol muy importante para el desarrollo de la civilización. Dentro del siglo dieciocho la madera era el material más usado y el mecanizado de metal era bastante limitado. Todo mejoró en el siglo diecinueve con la obtención de poder de la máquina de vapor y un poco más tarde con la electricidad. Estas nuevas potencias se transmitían a las máquinas por medio de bandas de piel ejes y poleas.

El arranque de esta viruta era lento, por ejemplo, planear una placa de medio metro cuadrado consumía una jornada entera de trabajo. Sin embargo, el desarrollo de talleres fue extenso durante el siglo diecinueve. Durante este mismo siglo, varios procesos para el hierro y el acero fueron desarrollados para producción industrial.

Los mejores materiales para herramienta existentes eran el acero con alto contenido de carbono y aleaciones de carbono, eran bastante duros gracias a los tratamientos térmicos, sin embargo, se ablandaban en cuanto la temperatura se elevaba, por lo tanto, la vida útil de la herramienta era muy corta.



El siguiente material empleado fue el acero Mushet que fue un resultado accidental. Se descubrió en experimentos que revelaron tungsteno en el material. Este duplicó el rendimiento en el torneado y fresado.

El gran evento en 1900 para la manufactura fue la demostración de Frederick Taylor en la feria mundial de Paris, en donde mostró el maquinado a velocidades grandes en donde la viruta era azul, y la herramienta no perdía su dureza y filo aunque estuviera al rojo vivo. Las velocidades que se manejaban en la industria eran de diez metros por minuto y el obtuvo datos de cuarenta metros por minuto y 4.8 mm de profundidad.

Taylor convirtió el corte de metal en una ciencia, lo que dio origen al estudio intensivo de materiales para maquinado, e hizo miles de pruebas al respecto junto con el ingeniero White. Esto originó a los aceros HSS, haciendo posible elevar los parámetros de corte y elevar la vida de la herramienta en un cuatrocientos por ciento aproximadamente. Taylor hizo una de las fórmula de desgaste y economía de la herramienta que aún es válida.

En 1915 se introdujeron a la industria las aleaciones de fundición dando un paso adelante en la evolución de los procesos de corte de metal, estas eran muy duras, aun en presencia de la temperatura y muy resistentes al desgaste abrasivo, pero eran muy frágiles y difíciles de elaborar.

Durante los años treinta, empezaba la era de los carburos cementados, los cuales fueron otro gran golpe en el desarrollo de los procesos de corte de metal. Para el año de 1934, había más de ciento treinta grados de carburos cementados patentados.



En base a estos hechos se forman las grandes empresas dedicadas a la elaboración de herramientas de corte que hoy conocemos, como Sandvick Coromant en 1942.

Aunque aquí no muere la historia de las herramientas de corte, es un buen parte aguas, en donde nos acercamos a las bases para las herramientas que se siguen utilizando en la actualidad.

Este gran avance, se ha realizado relativamente en poco tiempo, gracias al estudio intensivo de las formas, fuerzas, temperaturas, materiales y, en general, a los parámetros de las herramientas de corte que aún hoy se siguen estudiando y desarrollando.

El corte de los metales requiere de mucha potencia para separar la viruta de la pieza de trabajo. Aunque las herramientas de corte de hoy, son mucho más eficientes, las velocidades de arranque del material también se han incrementado. La comprensión de las fuerzas de corte, nos ha llevado a buenos y más fuertes filos de corte, que han permitido a la manufactura colocarse en donde está hoy en día. [2]

1.2.- Insertos

En la actualidad los insertos se han ido usando en los procesos de mecanizado en la industria metalmecánica ya que se eliminan las pérdidas de tiempos por el cambio de toda la herramienta, pues solo basta con retirarla y montar una nueva en el portainserto, o bien en los procesos con herramientas censadas su intercambio no afecta en nada a la línea de mecanizado. [3]

Los insertos se suelen afilar en el portaherramienta con diversos mecanismos de sujeción. Aunque no se hace con tanta frecuencia, los insertos se pueden sujetar con soldadura fuerte al portaherramientas. Debido a la diferencia de dilatación



térmica entre el inserto y el portaherramientas, el soldado se debe hacer con cuidado para evitar roturas o torceduras. [4]

La gran ventaja del inserto es indudablemente su rendimiento económico. Cuando se considera que la herramienta integral ha dejado de ser funcional, hay que sustituir toda la herramienta mientras que, en el caso del inserto, basta con cambiarla o, en muchos casos, con aplicarle una rotación en el caso de que tenga diferentes zonas de corte disponibles. Esta ventaja la convierte en la herramienta más adecuada en el mecanizado de piezas de mediano o gran tamaño, e incluso en operaciones de tamaño mediano para operaciones tales como el desbaste. De todas maneras, esta elección depende del usuario y de la estrategia de corte elegida. [5]

1.2.1.- Forma de los insertos y radio de la punta.

La forma de los insertos se refiere a la forma de la cara superior de los insertos. Las hay de forma cuadrada, triangular, rómbica, las llamadas trigonales, de ranurar, de roscar, e inclusive redondas.

Se buscan formas robustas si el mecanizado es pesado, de profundidades de corte importantes, o más agudas si es torneado en copiado, o zonas de difícil acceso.

En la siguiente figura (Fig. 1.1), en la línea 1, se aprecia mayor versatilidad a la derecha y mayor tenacidad hacia la izquierda; en la línea 2 se observa menor vibración en el mecanizado a la derecha y mayor requerimiento de potencia hacia la izquierda.

El radio de la punta (r_ϵ) afecta al acabado superficial de la pieza. Puede ser desde 0,2mm hasta 2,4mm. Para operaciones de acabado, se usan los valores menores, en cuanto para desbaste y desbaste pesado se emplean los valores de radio más altos.

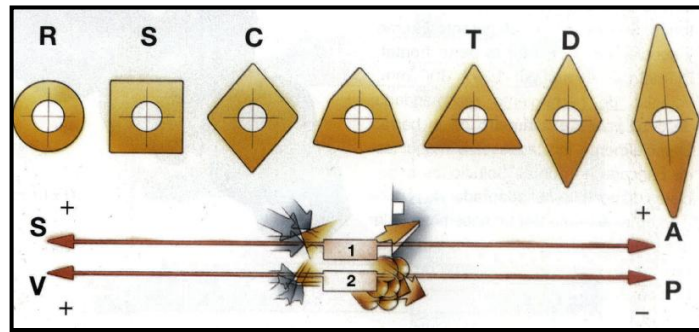


Figura 1. 1 Formas de insertos

Un radio de corte más grande ofrece un filo fuerte, resistente a avances importantes, en tanto que con un valor bajo se consigue realizar cortes más finos. [6]

1.2.2.- Geometría de corte.

Cuando se habla de geometría de corte, se refiere específicamente al perfil que el inserto tiene si lo observamos en un corte transversal. Dependiendo las formas y del tipo de mecanizado al que está destinado el inserto es que se provocará el correcto desprendimiento y rotura de la viruta.

1.2.2.1.- Insertos negativos.

Estos han sido desarrollados para lograr un torneado de alto rendimiento en los entornos de producción modernos. Los insertos están optimizados exclusivamente para alcanzar los requisitos específicos en las aplicaciones de torneado con unas calidades con las que se logran una acción de corte y una rotura de las virutas adecuadas.

Se utilizan principalmente para operaciones de torneado exterior, desde desbaste hasta acabado.

También pueden usarse con grandes ventajas para el mecanizado interior de agujeros grandes. Los insertos tienen una forma básica negativa que los dota de unas aristas de corte muy robustos (Fig. 1.2).

1.2.2.2.- Insertos positivos.

El sistema con un ángulo de incidencia de 7° en la arista de corte, se utiliza principalmente para desbaste ligero a acabado exterior de componentes pequeños, esbeltos y largos. El sistema de sujeción por tornillo ofrece importantes ventajas, como por ejemplo: sujeción segura de los insertos, excelente repetibilidad y flujo de virutas sin problemas.

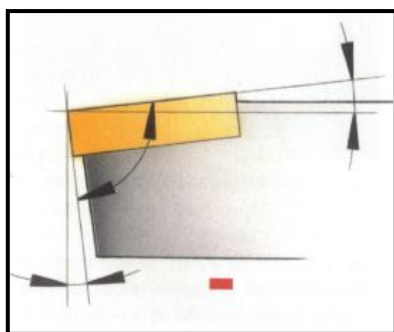


Figura 1. 2 Inserto negativo

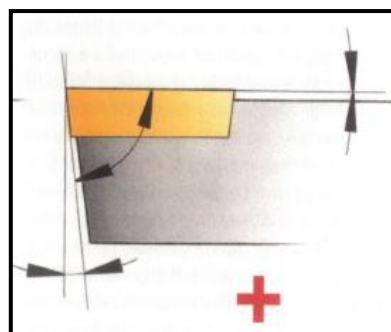


Figura 1. 3 Inserto positivo

Son muy aconsejables para el mecanizado en copia gracias a que el inserto positivo va montado de forma neutra en el portainsertos que le permite avanzar en distintas direcciones, ofreciendo una holgura constante alrededor de la periferia del inserto y garantiza un corte limpio con un buen acabado superficial y una gran duración de la herramienta (Fig. 1.3). [7]



1.3.- Teoría de Taylor

Esta teoría se basa en el cálculo de la velocidad de corte para una duración establecida de la herramienta entre dos afilados consecutivos.

Taylor para ello realiza una serie sistemática de larguísimos ensayos, haciendo intervenir en los mismos parámetros de corte, entre los que se encuentran: las condiciones de corte (velocidad de corte, avance, profundidad de pasada, etc.); la geometría de la herramienta (ángulo de situación principal, ángulo de desprendimiento normal, ángulo de caída de filo, radio de redondeamiento, etc.); la calidad del material de la herramienta y pieza; el criterio de duración o vida de la herramienta (desgaste frontal de la cara de incidencia, profundidad de cráter de la cara de desprendimiento, tolerancias de la pieza, etc.); y condiciones de trabajo, como el refrigerante utilizado, medios de fijación de la pieza, potencia y estado de la máquina, tipo de máquina, tipo de operación, etc.

Para estudiar la relación existente entre la vida de la herramienta y la velocidad de corte, fijó arbitrariamente diez de los parámetros y se dedicó a variar la velocidad de corte para estudiar la influencia en la duración del filo.

Definió como vida de la herramienta: “Longitud de tiempo de corte en el cual se puede usar la herramienta”.

Y para establecer la vida de la herramienta Taylor adoptó el criterio de caída de filo, que se detecta por la aparición de vibraciones, por un empeoramiento brusco del acabado superficial y por un sensible aumento de los esfuerzos de corte.

Los resultados obtenidos los llevó a una gráfica en la que en abscisas consta el logaritmo de la velocidad de corte y en ordenadas, el logaritmo de la vida de la

herramienta; de tal forma que observó que siempre que permaneciesen fijos los parámetros, cualesquiera que fuera su valor, siempre se obtenía una recta (Fig. 1.4).

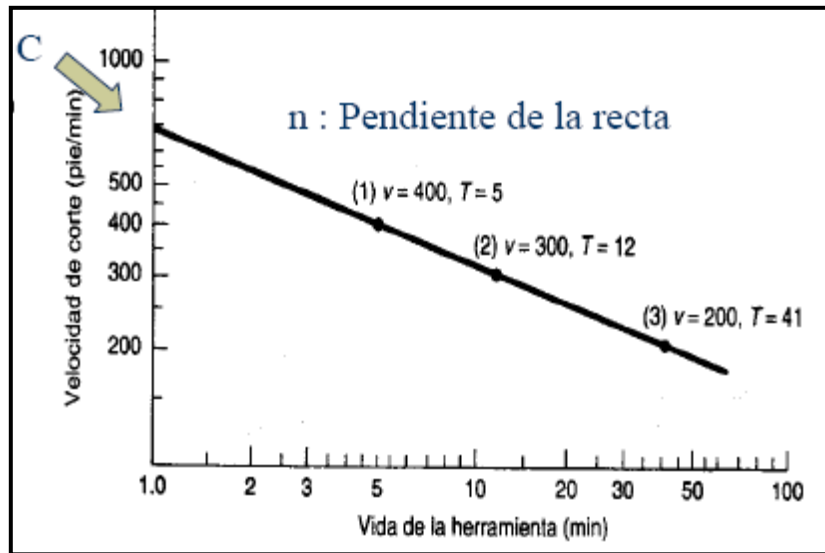


Figura 1. 4 Vida útil de la herramienta

Fórmula:

$$VT^n = C$$

n: Depende del material de la herramienta y pieza

V: Velocidad de corte

C: Es una constante que engloba todos los factores que han permanecido fijos durante el ensayo, por tanto, dependerá del avance, penetración, geometría y calidad de la herramienta, calidad del material a trabajar, condiciones de trabajo, criterio de desgaste, etc.

Expresa la velocidad de corte para una duración de la herramienta de 1min. y para los valores fijados en el ensayo. [8]



1.4.- Desgaste de la herramienta

El desgaste de la herramienta es uno de los factores más complejos de modelar cuando se trata de optimizar la producción. Aunque existen diversas teorías para estimar la vida media de una herramienta, en la práctica no son totalmente aplicables por multitud de factores. En concreto, no puede asegurarse que la vida media de una herramienta siempre se aproxime a un valor particular, ya que existen variables en el proceso que no son controlables y por tanto no tomadas en cuenta por dichas teorías. [9]

El desgaste de la herramienta es un proceso gradual, el cual es producto de una combinación de factores en el filo de corte. El desgaste es resultado de la interacción entre la herramienta, el material de la pieza de trabajo, de las condiciones de maquinado (parámetros de corte) y de la máquina herramienta. Estos factores pueden clasificarse en: mecánicos, térmicos, químicos y abrasivos.

El corte de material genera una gran cantidad de calor, principalmente en la cara de la viruta y en el flanco o cara de incidencia de la herramienta. La acción térmica es considerable sobre el material de la herramienta.

El proceso de formación de viruta significa que una nueva interfase de metal es forzada y producida continuamente a una gran presión y temperatura a lo largo del material de la herramienta. Por tanto la zona de corte es favorable para la difusión y reacciones químicas de los materiales.

1.4.1.- Tipos de desgaste

Existen diversos tipos de partículas muy duras en la mayoría de las piezas de trabajo, con frecuencia comparables en dureza con el material de la herramienta.

Estas partículas tienen un efecto abrasivo en la herramienta. Los principales tipos de desgaste son:

1.4.1.1.-Desgaste de flanco

Se produce cuando la cara de incidencia vertical del filo de corte fricciona contra la pieza de trabajo. Es el resultado de una velocidad de corte demasiado alta y una resistencia al desgaste demasiado baja del filo de corte. Principalmente es producido por el fenómeno de desgaste por abrasión. (Fig.1.4)



Figura 1. 4 Desgaste de flanco

1.4.1.2.- Craterización

El desgaste se debe a la abrasión de la viruta en la cara de desprendimiento y al fenómeno de difusión. El cráter está generado por el desprendimiento de partículas del material de la herramienta. Se debe al factor avance y a velocidades de corte excesivamente altas. (Fig.1.5)

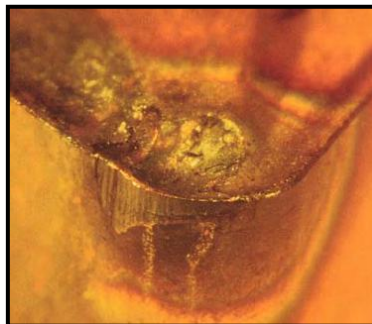


Figura 1. 5 Craterización

1.4.1.3.- Deformación plástica

Tiene lugar por la combinación de altas temperaturas y esfuerzos mecánicos muy altos en el filo de corte. Altas velocidades de corte, grandes avances y materiales de piezas duras dan como resultado compresión y calor. (Fig. 1.6)

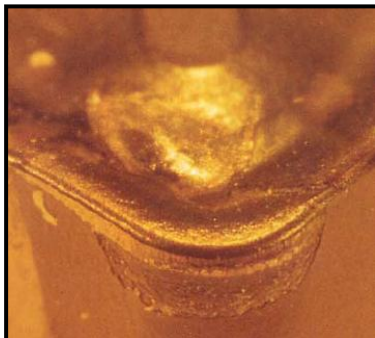


Figura 1. 6 Deformación plástica

1.4.1.4.- Fisuras térmicas

Es un desgaste por fatiga debida a los ciclos térmicos. Se presentan pequeñas fisuras perpendiculares al filo de corte que provocan el astillamiento del filo y una superficie defectuosa. La disposición de las fisuras, perpendiculares al filo de corte, hacen que las partículas de material de herramienta entre ellas puedan desprenderse del mismo. (Fig. 1.7)

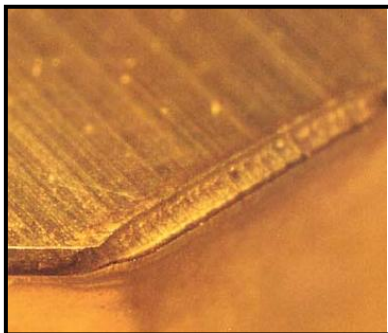


Figura 1. 7 Fisuras térmicas

1.4.1.5.- Fractura

El debilitamiento del filo y el incremento de las temperaturas y fuerzas llevarán eventualmente a la destrucción del filo. Es el resultado de varios factores que afectan el material de la herramienta incapaz de hacer frente a la demanda operativa. (Fig. 1.8)



Figura 1. 8 Fractura

1.4.2.- Mecanismos de desgaste

En el corte de metales se consideran cinco mecanismos básicos de desgaste: Desgaste por abrasión(1), Desgaste por difusión(2), Desgaste por oxidación(3), Desgaste por fatiga(4), Desgaste por adherencia(5). (Fig. 1.9)

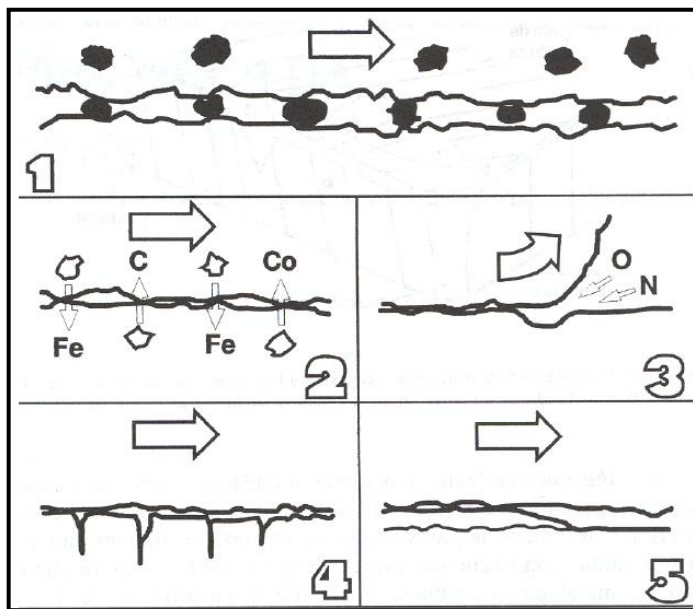


Figura 1. 9 Mecanismos de desgaste



1.4.2.1.- Desgaste por abrasión

Es un desgaste común y lo ocasionan principalmente las partículas duras en el material de la pieza de trabajo. La capacidad del filo de corte para resistir la abrasión está relacionada con la dureza de la herramienta.

1.4.2.2.- Desgaste por difusión

Es un proceso afectado por la acción química durante el proceso de mecanizado. Las propiedades químicas del material de la herramienta y la afinidad del material de la herramienta con el material de la pieza de trabajo determinan la formación del mecanismo de desgaste por difusión. El mecanismo depende mucho de la temperatura, por tanto es máximo a altas velocidades de corte. La dureza del material de la herramienta no afecta demasiado al proceso.

1.4.2.3.- Desgaste por oxidación

Altas temperaturas y la presencia de aire significan oxidación para la mayoría de los metales. Los materiales de algunas herramientas de corte son más propensos a desgastarse debido a la oxidación que otros, la parte de la interfase del filo de corte donde termina el ancho de la viruta y el aire tiene acceso al proceso de corte, es la parte que presenta mayor desgaste.

1.4.2.4.- Desgaste por fatiga

Es una combinación termomecánica. Las fluctuaciones de temperatura, así como la carga y descarga de fuerzas de corte, pueden ocasionar que los filos de corte se agrieten y rompan. La acción del corte intermitente conduce a generar continuamente calentamientos que provocan choques térmicos en el filo de corte. La



fatiga mecánica pura puede ocurrir si las fuerzas de corte son demasiado altas para la resistencia mecánica del filo de corte.

1.4.2.5.- Desgaste por adhesión

También conocido como desgaste por rozamiento ocurre a bajas temperaturas de maquinado en la cara de la herramienta que fricciona con la viruta. Puede tener lugar con materiales de viruta larga como con los de viruta corta: acero, aluminio y fundición. Con frecuencia este mecanismo conduce a la formación de un filo recrecido.

El filo de aportación puede desaparecer y volver a formarse o desprenderse y hacer que el filo de corte se rompa poco a poco en pequeños trozos o fracturarlo totalmente. [10]

1.5.- Sistemas de compensación de herramientas

Los sistemas de compensación de herramienta están diseñados principalmente para minimizar el proceso de cambio de herramienta y verificación del desgaste de la misma.

Dentro de los métodos realizados para la compensación de herramientas destacan los siguientes:

1.5.1.- Sistema de compensación de desgaste de la herramienta.

Módulos de compensación de desgaste de herramienta alternativos emplean un ajuste mediante una barra actuada de dibujo o un ajustador de estado sólido activado de manera eléctrica incluyendo el sensado y verificado físico del ajuste sin necesidad de esperar una calibración del dimensionamiento de la pieza de trabajo seguida del ajuste de compensación. En un solo encapsulado el material



piezoeléctrico es empleado con una herramienta montada flexible para producir una ajuste por deflexión controlada por el voltaje aplicado al material piezoeléctrico apilado. [11]

1.5.2.- Método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte basado en un sensor de proximidad de fibra óptica

El desgaste es estimado directamente a partir de un sensor de proximidad de fibra óptica (SPFO) con características de alta resolución y alto ancho de banda. El SPFO proporciona una medida de la distancia entre su extremo y el perfil de la herramienta. La principal contribución de este trabajo es la aplicación del SPFO para monitorear en línea el desgaste de una herramienta de fresado. Puesto que la luz emitida por el SPFO proviene de un fotodiodo, esta no produce daño a los ojos, lo que la hace más segura que los sensores de desplazamiento de tipo láser. Esta técnica permite monitorear el desgaste de la herramienta en tiempo real, mientras la herramienta gira, con una precisión inferior a 1 micra. [12]

1.5.3.- Compensación en tiempo real del desgaste de la herramienta en fresado por descarga eléctrica.

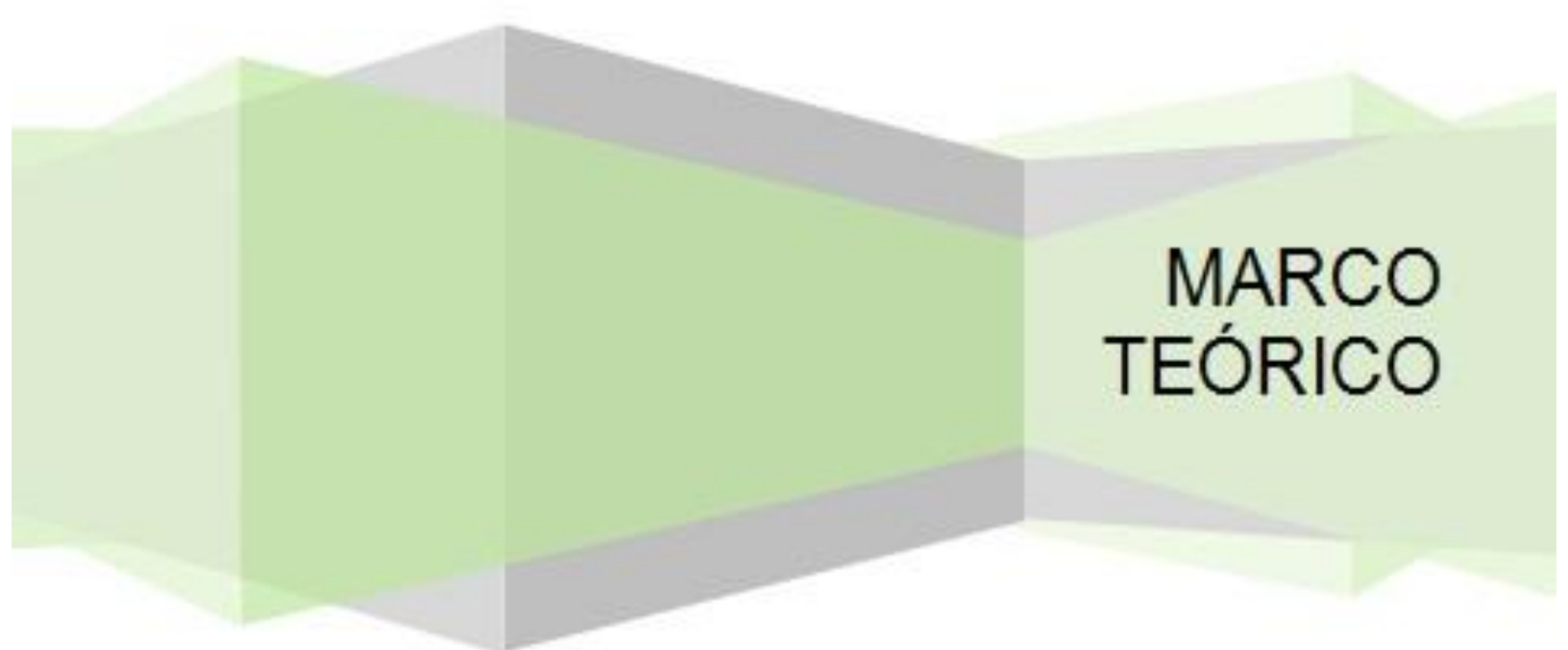
El maquinado preciso por fresado EDM (fresado por descarga eléctrica) necesita la compensación del electrodo de la herramienta. La compensación anticipada se basa en una simulación fuera de línea realizada antes del fresado. Esto puede ser combinado con correcciones basadas en mediciones periódicas de la longitud de la herramienta durante el maquinado. La compensación anticipada del desgaste de la herramienta presenta una restricción importante: se debe tener un modelo exacto de la geometría antes de ser maquinada para poder llevar a cabo la simulación del desgaste de la herramienta. Este artículo presenta un método nuevo para la compensación del desgaste. Una estimación en línea (es decir miden el desgaste cuando se está maquinando) del desgaste de la herramienta es usado para realizar una combinación de una compensación anticipada con la realizada en tiempo real. [13]



1.5.4.- Efecto de la compensación del desgaste de la herramienta bajo control de tolerancias secuenciales.

La producción de partes funcionales requiere de componentes dimensionales y otras operaciones geométricas para ser producidas con sus tolerancias. En orden de alcanzar una variación aceptable en las dimensiones finales de la parte, es necesario reducir la variación de las dimensiones manufacturadas. El control de tolerancias secuencial, el cual afirma la capacidad de medir la salida de operaciones anteriores, ha sido desarrollado para compensar el efecto no repetitivo (aleatorio) de variaciones en las salidas del proceso. Variación aleatoria, sin embargo, no es la única perturbación que afecta al proceso. El desgaste de la herramienta de corte con el tiempo, crean una pérdida gradual de material de corte en la herramienta la cual introduce una variación sistemática en la salida de la operación de maquinado. En este artículo se propone el uso de un sistema de adquisición de información de mediciones para compensar ambas variaciones tanto las aleatorias así como las sistemáticas (desgaste en la herramienta) donde sea apropiado. [14]

CAPÍTULO II



MARCO
TEÓRICO



2.1.- Teoría de corte

Es importante que los principios de corte de metales sean bien comprendidos con el objeto de que tengan una aplicación económica.

Los principios se emplean en operaciones tales como torneado, cepillado, fresado y taladrado, tanto como en otros procesos ejecutados por máquinas herramientas. Las partes se producen desprendiendo metal en forma de pequeñas virutas. El trabajo central de estas máquinas está en la herramienta cortante que desprende estas virutas.

La elección de herramientas adecuadas, velocidades y avances de corte es un compromiso, ya que entre más rápido se opere la máquina, es mayor la eficiencia tanto del operador como de la máquina. Sin embargo, desafortunadamente, tal uso acelerado acorta grandemente la duración de la herramienta. [15]

2.1.1.- Formación de viruta

Las virutas están compuestas por pequeñas porciones o elementos de viruta, que en virtud del movimiento del filo de la herramienta se van corriendo unas sobre otras en forma de laminillas y que según sea la naturaleza del material de las piezas quedan más o menos firmemente unidas entre sí. [16]

A partir de la apariencia de la viruta se puede obtener mucha información valiosa acerca del proceso de corte, ya que algunos tipos de viruta indican un corte más eficiente que otros. El tipo de viruta está determinado primordialmente por:

- a) Propiedades del material a trabajar.
- b) Geometría de la herramienta de corte.



c) Condiciones del maquinado (profundidad de corte, velocidad de avance y velocidad de corte). [17]

Existen tres tipos de virutas que se producen comúnmente en el corte:

- virutas discontinuas (Figura 2.1a)
- virutas continuas (Figura 2.1b)
- continuo con el borde acumulado (Figura 2.1c)[18]

2.1.1.1. - Viruta discontinua

Este caso representa el corte de la mayoría de los materiales frágiles tales como el hierro fundido y el latón fundido; para estos casos, los esfuerzos que se producen delante del filo de corte de la herramienta provocan fractura. Lo anterior se debe a que la deformación real por esfuerzo cortante excede el punto de fractura en la dirección del plano de corte, de manera que el material se desprende en segmentos muy pequeños.

Por lo común se produce un acabado superficial bastante aceptable en estos materiales frágiles, puesto que el filo tiende a reducir las irregularidades.

Las virutas discontinuas también se pueden producir en ciertas condiciones con materiales más dúctiles, causando superficies rugosas. Tales condiciones pueden ser bajas velocidades de corte o pequeños ángulos de ataque en el intervalo de 0° a 10° para avances mayores de 0.2 mm. El incremento en el ángulo de ataque o en la velocidad de corte normalmente elimina la producción de la viruta discontinua.

2.1.1.2. - Viruta continua

Este tipo de viruta, el cual representa el corte de la mayoría de materiales dúctiles que permiten al corte tener lugar sin fractura, es producido por velocidades

de corte relativamente altas, grandes ángulos de ataque (entre 10° y 30°) y poca fricción entre la viruta y la cara de la herramienta.

Las virutas continuas y largas pueden ser difíciles de manejar y en consecuencia la herramienta debe contar con un rompevirutas que retuerce la viruta y la quiebra en tramos cortos.

2.1.1.3. - Viruta continua con el borde acumulado

Este tipo de viruta representa el corte de materiales dúctiles a bajas velocidades en donde existe una alta fricción sobre la cara de la herramienta. Esta alta fricción es causa de que una delgada capa de viruta quede cortada de la parte inferior y se adhiera a la cara de la herramienta. La viruta es similar a la viruta continua, pero la produce una herramienta que tiene una saliente de metal aglutinado soldada a su cara. Periódicamente se separan porciones de la saliente y quedan depositadas en la superficie del material, dando como resultado una superficie rugosa; el resto de la saliente queda como protuberancia en la parte trasera de la viruta. [19]

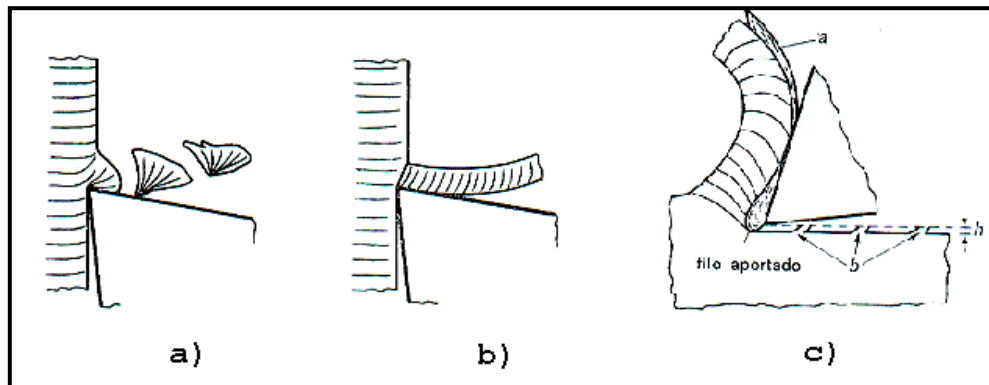


Figura 2. 1 Tipos de virutas; a) virutas discontinuas, b) virutas continuas y c) virutas con el borde acumulado.

2.1.2.- Ángulos

El corte de los metales se logra por medio de herramientas con la forma adecuada. Una herramienta sin los filos o ángulos bien seleccionados ocasionará gastos excesivos y pérdida de tiempo. [20]

El funcionamiento adecuado de un cortador depende de los ángulos de alivio y de ataque, que deben formarse en la herramienta. Aunque estos ángulos varían para diferentes materiales, la nomenclatura es la misma para todas las herramientas de corte.

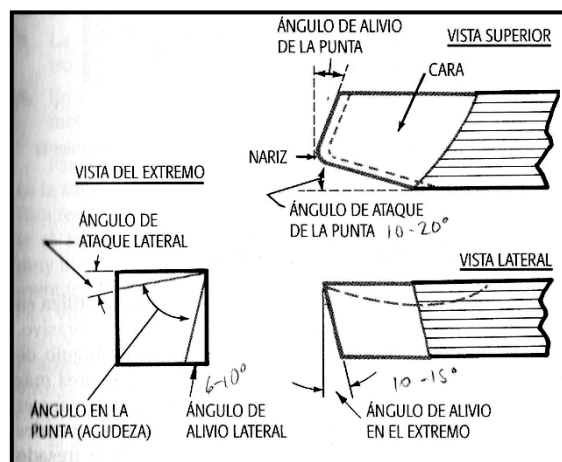


Figura 2. 2 Ángulos y claros en una herramienta de corte para torno

El *ángulo del filo de corte lateral* es el que forma la arista cortante con el costado del cuerpo de la herramienta. (Fig. 2.2). Los ángulos de ataque en insertos de torno para uso general varían de 10° a 20° , dependiendo del material a cortar. Si el ángulo es demasiado grande (más de 30°), la herramienta tenderá a vibrar.

El *ángulo del filo de corte frontal* es el que forma la arista cortante y una línea perpendicular al costado de la herramienta (Fig. 2.2). Este ángulo puede variar de 5° a 30° , dependiendo del tipo de corte y acabado deseados. Un ángulo de 5° a 15° es

satisfactorio para cortes de desbaste; los ángulos entre 15° y 30° se utilizan en insertos de uso general.

El *ángulo de incidencia lateral* es el formado en el flanco de la herramienta, debajo de la arista cortante (Fig. 2.2 y 2.3). Este ángulo generalmente vale 6° a 10° . El claro lateral en un buril o cortador permite que la herramienta avance longitudinalmente hacia la pieza de trabajo giratoria, y evita que el flanco roce contra la pieza.

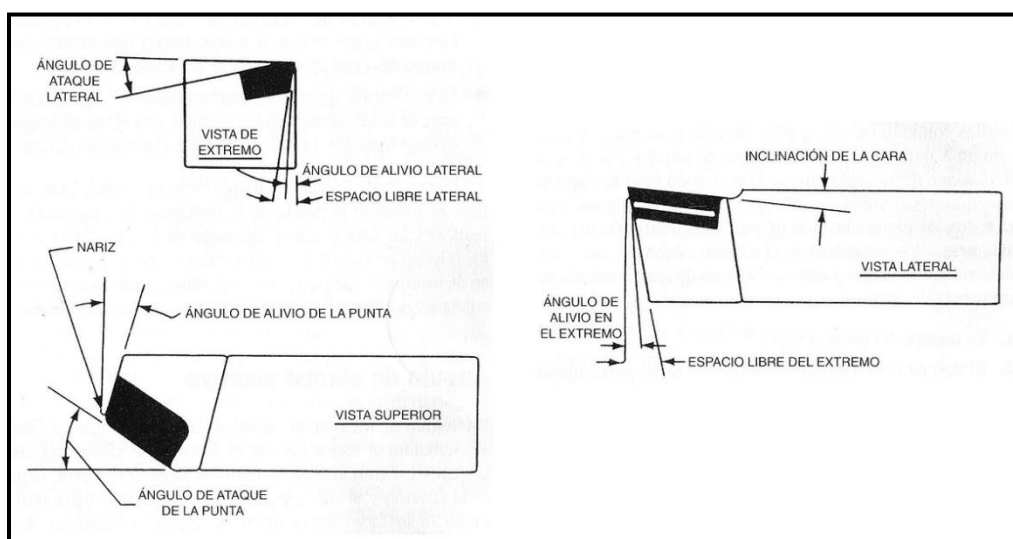


Figura 2. 3 Ángulos y claros en cortadores (otra perspectiva)

El *ángulo de incidencia frontal* es el que se tiene bajo de la nariz y la parte inferior del inserto, lo que permite a la herramienta de corte penetrar en la pieza de trabajo. Es generalmente de 10° a 15° para herramientas de uso general (Fig. 2.2 y 2.3). Tal ángulo varía según la dureza, la clase de material y el tipo de corte. Esta medida angular es menor para materiales más duros, a fin de proporcionar apoyo bajo el borde cortante.

El *ángulo de ataque lateral* es el que se forma en la cara a partir de la arista cortante. En cortadores de uso general, dicho ángulo es por lo general de 14° (Fig. 2.2 y 2.3). Esta forma angular crea un borde cortante más agudo y hace que la viruta



se desprenda con rapidez. Para materiales más suaves, este ángulo de ataque por lo general aumenta. Puede ser positivo o negativo, dependiendo del material a cortar.

El *ángulo en la punta* en el producido al formar los ángulos de ataque y de alivio (espacio libre lateral) en un cortador (Fig. 2.2). Este ángulo puede alterarse, dependiendo del tipo de material por maquinarse, y será mayor en el caso de materiales duros.

El *ángulo de inclinación de la cara* es el de la pendiente hacia atrás de la cara de la herramienta a partir de la nariz. Mide por lo general aproximadamente 20° y se proporciona en el portaherramientas (Fig. 2.3). Dicha inclinación posterior permite que las virutas vuelen desde la punta de la herramienta de corte. Se tienen dos clases de ángulos de inclinación posterior o superior en las herramientas de corte, y siempre se encuentran en la parte superior del cortador:

- La *inclinación positiva de ataque*, donde la punta de la herramienta de corte y el filo entran en contacto primero con el metal, hacen que la viruta se mueva hacia abajo por la cara del cortador.
- La *inclinación negativa de ataque*, donde la cara de la herramienta hace contacto con el metal, origina que la viruta sea forzada hacia arriba por la cara del cortador. [21]

2.1.3.- Fuerzas de corte

Las fuerzas sobre una herramienta cortante para un material dado dependen de un número de consideraciones:

- Las fuerzas en las herramientas no cambian significativamente con un cambio en la velocidad de corte.
- A mayor avance de la herramienta, mayores las fuerzas.
- A mayor profundidad de corte, mayores fuerzas.

- La fuerza tangencial aumenta con el tamaño de la viruta.
- La fuerza longitudinal disminuye si el radio de la punta se hace más grande o si el ángulo del filo lateral cortante aumenta.
- En cerca de cada 1% de cada grado, se reduce la fuerza tangencial, en tanto el ángulo de inclinación posterior aumenta.
- Para poder medir las fuerzas ejercidas en una pieza se usan dinamómetros electrónicos, se miden las reacciones lejos de la punta de corte. Se combinan transductores y una base para medir 1, 2 o 3 fuerzas y momentos torcionales. [22].

2.1.3.1.- Corte ortogonal

En la vida real, el proceso de corte es tridimensional (oblicuo), pero para entender el concepto se propone un modelo bidimensional llamado de “Corte Ortogonal”. (Figura 2.4)

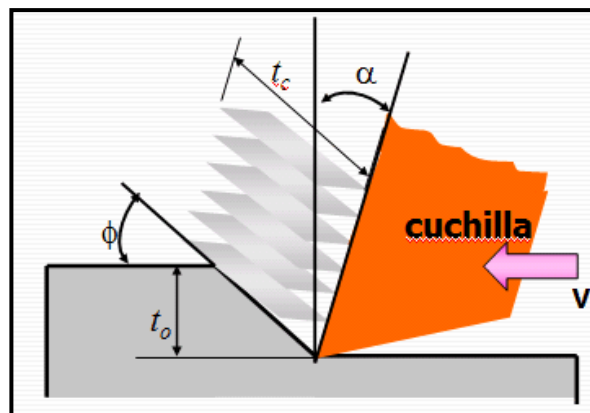


Figura 2. 4 Modelo de corte ortogonal

En este modelo las fuerzas que actúan en la viruta son:

- F_s = Resistencia al corte y actúa sobre la línea del plano de corte.
- F_n = Fuerza normal al plano de corte; es la resistencia que ofrece la pieza o el material.

- N = Fuerza que ofrece la herramienta de corte y actúa sobre la viruta, normal a la cara de corte.
- F = Fuerza de fricción de la herramienta actuando sobre el metal, actúa en contra del movimiento de la viruta sobre la cara de la herramienta.[2]

A continuación se muestra un diagrama de cuerpo libre de la viruta con las fuerzas actuantes. (Figura 2.5)

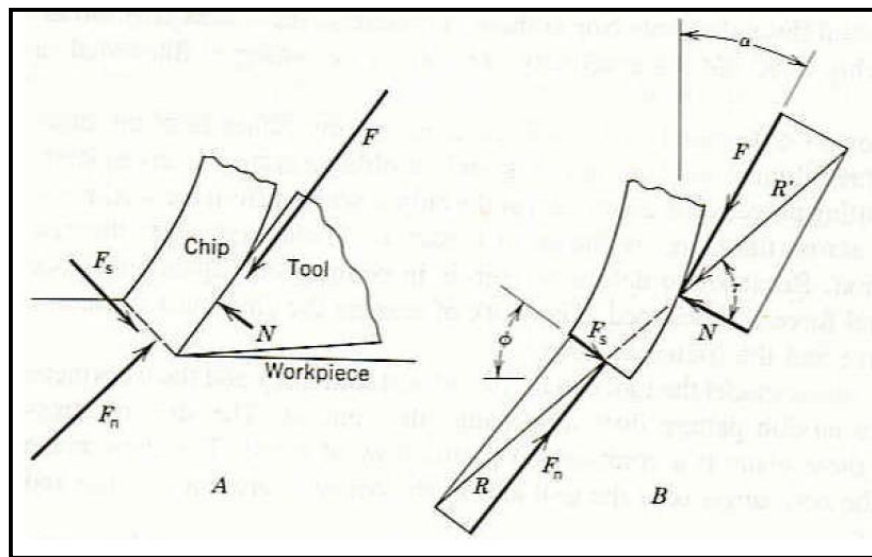


Figura 2. 5 Diagrama de cuerpo libre en la viruta

Como se puede ver, existe un equilibrio entre las dos fuerzas resultantes ($R = R'$), así que las componentes de la fuerza de la pieza sobre la viruta son la fuerza de corte F_s y la fuerza normal compresora F_n . Las fuerzas de la herramienta sobre la viruta son F y N .

Estas fuerzas se pueden relacionar con las fuerzas necesarias en la herramienta F_t y F_c , siendo la primera, la fuerza de empuje, en dirección perpendicular a la velocidad de corte y a la superficie de trabajo, y la segunda, la fuerza de corte en dirección de la velocidad de corte. Por medio del método de superposición, aplicado a los triángulos de fuerzas vistos en la figura anterior. F_c es

la fuerza horizontal de corte en la herramienta y F_t la fuerza en dirección vertical, necesaria para soportar la fuerza vertical ejercida sobre la herramienta. (Figura 2.6)

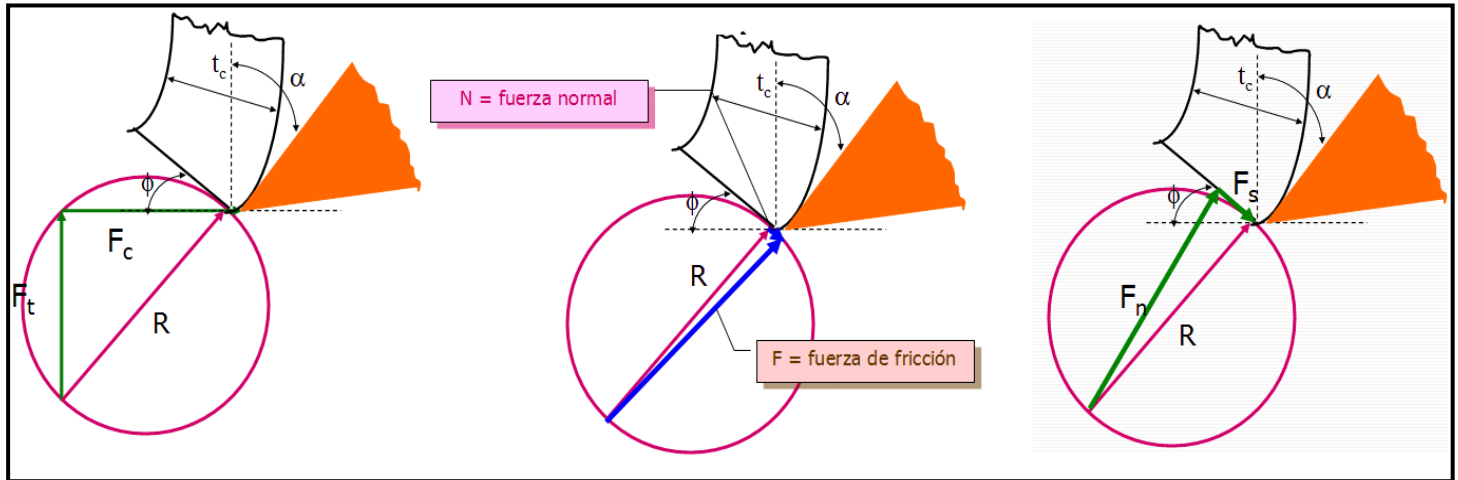


Figura 2. 6 Fuerzas de corte

Obteniendo así que:

$$F = F_t \cos \alpha + F_c \sin \alpha$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha$$

$$m = \tan t = F/N$$

Donde m es el coeficiente de fricción y t es el ángulo de fricción.

El modelo mostrado anteriormente, simula o propone el mecanizado de una plancha o una situación similar. Este modelo se puede aplicar al corte en el torno, teniendo cuidado en la dirección y acomodo de las fuerzas.

Si F_c es la fuerza que actúa en dirección de la velocidad de corte y F_t es la fuerza de empuje o de avance, se debe tener cuidado que operación se realiza en el torno, puesto que si es un cilindrado F_t es en dirección axial, pero si se realiza un tronzado, F_t es en dirección radial. [23]

2.1.3.2.- Corte oblicuo

El corte ortogonal es solo un caso particular del corte oblicuo, pues en la práctica se presenta un ángulo de inclinación, α_c , que hace el estudio más difícil. La mayoría de las operaciones de corte suponen herramientas de forma tridimensional (oblicuas). (Figura 2.7)

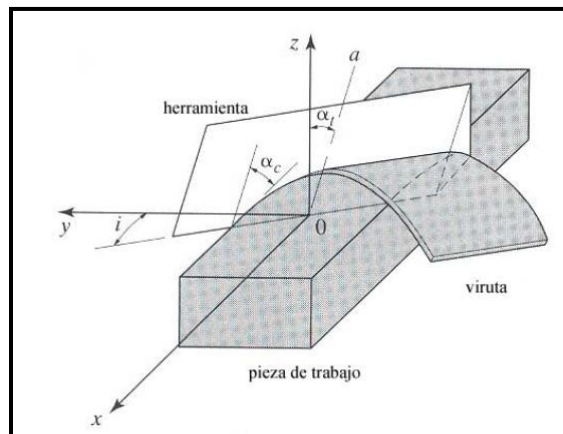


Figura 2. 7 Corte oblicuo

En el corte oblicuo, el filo de corte está en un ángulo i , llamado ángulo de inclinación. Hay que notar la dirección lateral del movimiento de la viruta. La viruta fluye hacia arriba de la cara de ataque de la herramienta en un ángulo α_c (ángulo de flujo de la viruta), medido en un plano de la cara de la herramienta. El ángulo de ataque normal, α_n , es una propiedad geométrica básica de la herramienta. Este es el ángulo entre la normal Oz a la superficie de la pieza de trabajo y la línea Oa en la cara de la herramienta.

En el corte oblicuo actúa un filo de corte, sin embargo como el término oblicuo lo dice, la velocidad de la pieza de trabajo es oblicua o inclinada al filo de corte a un ángulo i . Esto representa más implicaciones, una es que la dirección de la velocidad de la viruta V_c no es paralela a la velocidad de corte V . El corte oblicuo puede ser analizado en dos dimensiones pero el problema es determinar un plano de referencia



correcto. Por tanto los vectores de fuerza en tres dimensiones pueden encontrarse aplicando una transformación rotacional. [10]

2.1.4.- Velocidades

La velocidad de corte v es la velocidad instantánea del movimiento primario de la herramienta en relación con la pieza de trabajo (en un punto seleccionado sobre el borde cortante o filo). [24]

Las velocidades para corte son importantes para obtener la forma, tamaño y acabado de superficie deseados así como para aumentar la duración y eficiencia de la herramienta de corte. Las velocidades de corte para los tornos están basadas en la dureza del material, el material de la herramienta de corte, avance y profundidad de corte. La velocidad de corte es la velocidad, en pies de superficie por minuto (pspm) a la cual la herramienta de corte remueve el material de la pieza de trabajo. La velocidad de corte se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$CS = \frac{RPM \times D \times \pi}{12} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

CS= velocidad de corte (pspm)

RPM= revoluciones por minuto

D= diámetro de la pieza de trabajo (pulgadas)

π = 3.1416 (constante)

Para determinar las RPM cuando se conoce la velocidad de corte deseada, se utiliza la siguiente fórmula: [1]

$$RPM = \frac{CS \times 12}{D \times \pi} \quad \text{Ec. 2}$$



En un proceso de mecanizado hay tres velocidades de interés:

- La velocidad de corte V , que es la velocidad de la herramienta relativa a la velocidad de trabajo y paralela a la fuerza de corte.
- La velocidad de la viruta V_c , que es la velocidad de la viruta relativa a la de la herramienta y dirigida a lo largo de la cara de la herramienta.
- La velocidad cortante V_s , que es la velocidad de la viruta relativa a la de la pieza de trabajo y dirigida a lo largo del plano de corte. [10]

2.1.5.- Materiales

Las herramientas de corte se hacen con diversos materiales, cada uno con propiedades y características específicas. Los materiales comunes para herramientas de corte incluyen: aceros para alta velocidad, AAV (o sus siglas en ingles HSS que significa high speed steel), carburos, acero recubiertos, cerámicos, etc., de los cuales se verán algunos solamente. [1]

Una herramienta de corte arranca metal debido a que es más aguda y más dura que el material de la pieza que se está mecanizando. [6]

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

- Tenacidad. Para evitar las fallas por fractura, el material de la herramienta debe tener alta tenacidad. La tenacidad es la capacidad de absorber energía sin que falle el material. Se caracteriza generalmente por una combinación de resistencia y ductilidad del material.



- Dureza en caliente. La dureza en caliente es la capacidad del material para retener su dureza a altas temperaturas. Esta es necesaria debido al ambiente de altas temperaturas en que opera la herramienta.
- Resistencia al desgaste. La dureza es la propiedad más importante que se necesita para resistir el desgaste abrasivo. Todos los materiales para herramientas de corte deben ser duros. Sin embargo, la resistencia al desgaste en el corte de metales no solamente depende de la dureza de la herramienta, sino también de otros mecanismos de desgaste. El acabado superficial de la herramienta, la composición química de la herramientas y de los materiales de trabajo, y el uso de un fluido para corte son otras características que afectan la resistencia al desgaste. [25]

2.1.5.1.- Aceros de alta velocidad

Los aceros rápidos son los más ampliamente utilizados como material para herramientas de corte en la ingeniería actual. Al ser recocidos pueden ser forjados y maquinados, con la relativa facilidad en la producción de herramientas de una sola punta, brocas, fresadoras, y en las conformadoras más complicadas. Sin embargo, al ser endurecidos combinan la fuerza para trabajar sin apoyo, con ángulos de inclinación positiva elevados, y una dureza razonable que conservan casi hasta el rojo vivo. [26]

Estos aceros son de diversas aleaciones para mejorar las propiedades de la herramienta. El acero más común para herramientas consiste en 18% de cromo, 4% de níquel y 1% de vanadio. Los aceros aleados para alta velocidad son superiores al acero al carbono, porque las herramientas mantienen su filo con temperaturas y velocidades de corte más elevadas.

Los aceros para alta velocidad se identifican de acuerdo con su contenido de aleación, como cobalto, molibdeno y tungsteno. El tungsteno en la aleación aumenta



la capacidad de resistencia de la herramienta al calor. Las herramientas de acero al carbono se ablandan entre 177 y 205 °C (350 a 400 °F) y pierden el filo; las herramientas de acero al tungsteno mantienen su filo hasta los 538 °C (1 000 °F); con esta resistencia adicional al calor, puede aumentarse en proporción la velocidad de corte. Los aceros para herramientas se clasifican, además, por su tratamiento térmico (enfriadas por inmersión en agua o aceite) y por sus propiedades físicas (resistencia al calor, resistencia al desgaste, tenacidad y deformación). La resistencia al impacto aumenta con mayor contenido de carbono, pero disminuye la resistencia a la abrasión. El acero de alta velocidad se utiliza para brocas, escariadores, fresas, punzones y dados, para herramientas de torno y fresadoras y muchos más usos. [1]

2.1.5.2.- Carburos Cementados

Los carburos cementados son considerados, desde el punto de vista técnico, uno de los más grandes éxitos de los materiales compuestos, en los cuales las propiedades benéficas de sus dos componentes principales son retenidas en el compuesto final. La dureza y la resistencia al desgaste lo suministra la fase carburo, mientras que la fase metálica contribuye a la ductilidad y la tenacidad del compuesto. Las propiedades finales del carburo cementado están, entonces, basadas en la interacción de sus componentes y su aspecto microestructural. [27]

Las herramientas de carburos segmentados se componen de carbono, un aglutinante y algún material de aleación, por lo general tungsteno, tantalio o titanio. Las herramientas se hacen con metalurgia de polvos, en que los ingredientes se prensan para formarlos.

Las aplicaciones de los carburos cementados incluyen desbastado y acabado en metales ferrosos y no ferrosos, partes de maquinaria, matrices y calibradores. Los carburos dan gran dureza de superficie a las herramientas de corte. El carburo de tungsteno es el tipo más común para herramientas; pero cuesta mucho más que los aceros para herramientas. Para reducir el costo de la herramienta, se fabrican los



filos o bordes cortantes de carburo y se sueldan con latón en vástagos de acero de herramienta, o se emplean como insertos reemplazables. [1]

Las herramientas de carburo son extremadamente duras y pueden hacerse funcionar a velocidades de corte mayores que los aceros rápidos. Por consiguiente, han sustituido a éstos en numerosos procesos de mecanizado de metales. Sin embargo, no son tan tenaces como los aceros rápidos y, ocasionalmente, reaccionan químicamente durante el corte con las fundiciones y los aceros. A grandes velocidades de corte, pierden dureza y pueden deformarse plásticamente. [28]

2.1.5.3.- Recubrimientos

La dificultad para maquinar nuevos materiales, y la necesidad de mejorar el desempeño en el maquinado de materiales técnicos más comunes, ha originado desarrollos importantes en las herramientas recubiertas.

Por sus propiedades únicas, como menor fricción y mayor resistencia a grietas y al desgaste, las herramientas recubiertas se pueden usar a grandes velocidades de corte, reduciendo tanto el tiempo necesario como los costos, de las operaciones de maquinado. El tiempo de corte se ha reducido por un factor de más de 100 a partir de 1900 (Figura 2.8). Las herramientas recubiertas pueden durar hasta 10 veces más que las no recubiertas. [4]

Estas herramientas de corte se fabrican depositando una capa delgada de nitruro de titanio resistente al desgaste, o de carburo de titanio o bien de óxido de aluminio (cerámico) en la arista cortante de la herramienta. Dicha capa aumenta la lubricación, mejora la resistencia al desgaste del borde cortante en 200 a 500 %, reduce la resistencia a la ruptura hasta un 20 %, al mismo tiempo que aporta una más larga duración y permite velocidades de corte más altas.

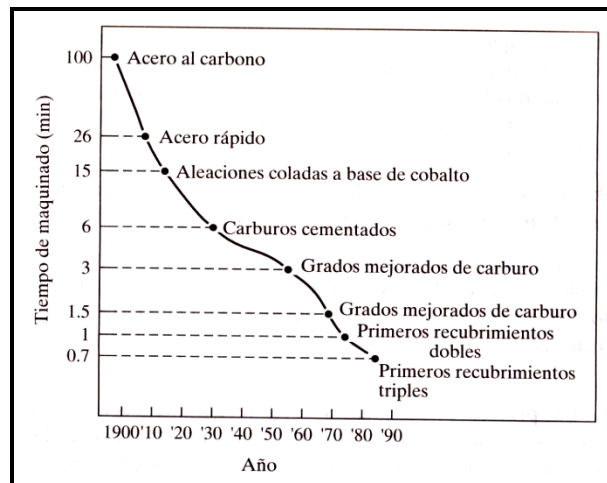


Figura 2. 8 Tiempo relativo de maquinado con diversos materiales de herramienta.

Los insertos recubiertos de titanio ofrecen una mayor resistencia al desgaste en velocidades inferiores a 500 pies/min; las puntas cubiertas de cerámico son más adecuadas para velocidades de corte mayores. Ambas clases de insertos se utilizan para cortar aceros, hierros colados y materiales no ferrosos. [21]

2.2.- Máquinas-herramienta de corte

Las máquinas-herramienta aumentan el rendimiento, la economía y sobre todo la exactitud del trabajo humano. Las piezas que se obtienen son de superficies planas, cilíndricas, cónicas o curvas. Los elementos de maniobra son de fácil manejo y dispuestos de modo claramente visible. También poseen dispositivos que facilitan una sujeción rápida y segura de las herramientas y las piezas. [29]

Estas máquinas fabrican piezas con ayuda de herramientas, utilizando energía eléctrica para realizar el trabajo necesario para arrancar el material, llamadas así en su inicio por sustituir el empleo de la energía humana y herramientas manuales, en la fabricación.

Se pueden clasificar en función del movimiento de corte, de quién posea ese movimiento y el número de los filos de la herramienta. (Figura. 2.9). [30]

<i>Máquinas herramientas</i>	<i>Traslación</i>	<i>Herramienta</i>	<i>Limadora</i>	<i>Monofilo</i>
			<i>Mortajadora</i>	<i>Monofilo</i>
		<i>Pieza</i>	<i>Brochadora</i>	<i>Multifilo</i>
			<i>Cepilladora</i>	<i>Monofilo</i>
	<i>Rotación</i>	<i>Herramienta</i>	<i>Taladradora</i>	<i>Multifilo</i>
			<i>Fresadora</i>	<i>Multifilo</i>
		<i>Pieza</i>	<i>Mandrinadora</i>	<i>Monofilo</i>
			<i>Rectificadora</i>	<i>Multifilo</i>
			<i>Torno</i>	<i>Monofilo</i>

Figura 2. 9 Clasificación de las máquinas-herramienta de corte.

2.2.1 Máquina fresadora:

En la máquina fresadora se efectúa la producción de piezas por el control mecánico del desplazamiento de la pieza y el movimiento de corte de una herramienta giratoria con múltiples aristas cortantes.

En la máquina fresadora se desprende metal cuando la pieza avanza contra la herramienta cortante (Figura 2.10), exceptuando el movimiento de rotación, el cortador no tiene otro movimiento. El cortador de la máquina fresadora tiene una serie de aristas cortantes sobre la circunferencia que actúan como un cortador individual durante el ciclo de rotación.

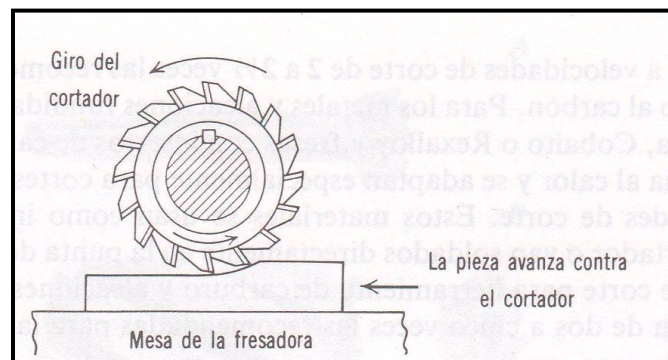


Figura 2. 10 Operación simple de fresado



La pieza se monta sobre una pieza que controla el avance contra el cortador. En la mayoría de las máquinas la mesa tiene 3 posibles movimientos, longitudinales, transversales y verticales, pero en algunas, la mesa puede tener un movimiento de giro o rotación.

La fresadora es la más versátil de todas las máquinas herramientas; superficies planas o perfiles determinados pueden ser maquinados con acabado y precisión excelente. Los ángulos, ranuras, dientes de engranes o cortes interiores pueden hacerse empleando cortadores diferentes. Las brocas, rimas y herramientas para mandrilar pueden montarse en el alojamiento del árbol quitando el árbol con el cortador. Dado que todos los movimientos de la mesa tienen ajustes micrométricos, los agujeros y otros cortes pueden espaciarse con precisión. La mayoría de las operaciones realizadas en cepilladoras, generadoras de engranes y brochadotas, pueden hacerse en la máquina fresadora. Estas producen un mejor acabado y mantienen los límites de las tolerancias con una mayor facilidad que las cepilladoras. Pueden hacerse cortes profundos y sin sacrificio apreciable en el acabado o precisión. Estas ventajas además de la gran variedad de fresas hacen a la máquina fresadora indispensable en el taller y en la fabricación de herramientas.

Las máquinas fresadoras pueden clasificarse como sigue:

2.2.1.1.- Fresadoras horizontales

Esencialmente, constan de una bancada vertical llamada cuerpo de la fresadora, a lo largo de una de cuyas caras se desliza una escuadra llamada ménsula o consola, sobre la cual, a su vez, se mueve un carro portamesa que se ha de fresar. En la parte superior de la bancada están alojados los cojinetes en los que gira el árbol o eje principal, que a su vez puede ir prolongado por un eje portafresas. Estas fresadoras se llaman universales cuando la mesa de trabajo puede girar alrededor de un eje vertical y puede recibir movimiento automático en sentido vertical, longitudinal y transversal, o al menos en sentido longitudinal.

2.2.1.2.- Fresadoras universales

La máquina fresadora universal se caracteriza por la multitud de aplicaciones que tiene. Su principal nota característica la constituye su mesa inclinable que puede bascular tanto hacia la izquierda como hacia la derecha en 45° . Esta disposición sirve con ayuda del cabezal divisor para fresar ranuras espirales. Los tres movimientos de la mesa en sentido vertical, longitudinal y transversal se pueden efectuar a mano y automáticamente en ambos sentidos. Topes regulables limitan automáticamente la marcha en el punto deseado. En las manivelas que sirven para mover la mesa hay discos graduados que permiten ajustes finos. Estas máquinas encuentran aplicación en mecánica fina, en construcción de herramientas y de moldes, en la fabricación de piezas sueltas y de pequeñas series. En estas aplicaciones tienen empleos muy variados mediante accesorios basculantes y fácilmente recambiables que las hacen aptas para toda clase de trabajos con arranques de viruta. (Figura 2.11)

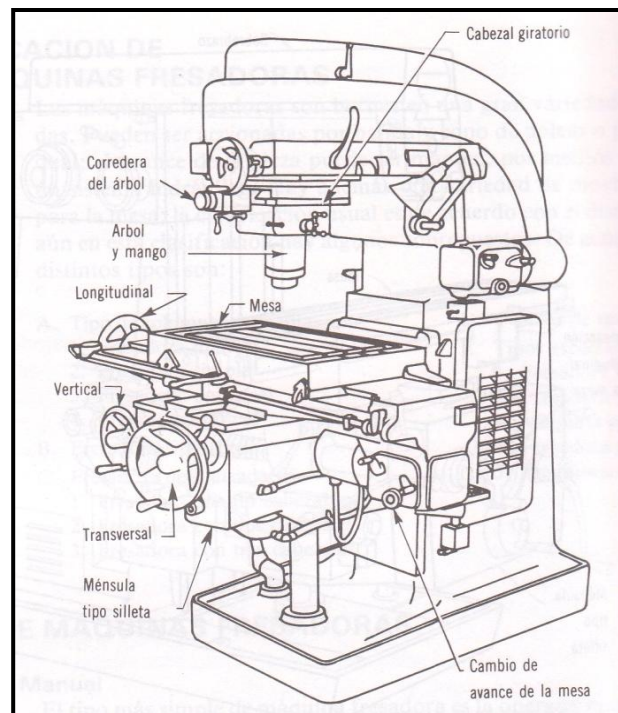


Figura 2. 11 Fresadora universal



2.2.1.3.- Fresadoras verticales

Así se llaman las fresadoras cuyo eje portafresas es vertical. En general son monopoleas y tiene la mesa con movimiento automático en sentido vertical, longitudinal y transversal. En la fresadora vertical el husillo porta -fresa está apoyado verticalmente en una cabezal porta-fresa generalmente giratorio. La fresadora vertical se aplica generalmente para trabajos de fresado frontales. [31]

2.2.2.- Cepillo de codo

Un cepillo de codo es una máquina con herramienta de corte alternativa, del mismo tipo que la del torno, la cual efectúa un corte rectilíneo. Moviendo la pieza a través de la trayectoria de esta herramienta, se genera una superficie plana, independientemente de la forma de la herramienta. La perfección no depende de la exactitud de la herramienta como sucede cuando se usa una fresa para el mismo tipo de trabajo. Por medio de herramientas especiales, accesorios y dispositivos para sujetar la pieza, un cepillo de codo puede cortar también cuñeros externos e internos, gargantas espirales, cremalleras, colas de milano, ranuras T y otras diversas formas.

Los cepillos de codo se clasifican de la siguiente forma:

1. Horizontal (corte de avance)
 - Simple (trabajo de producción)
 - Universal (trabajo de herramientas)
2. Horizontal (corte en retroceso)
3. Vertical
 - Ranuradora
 - Mortajadora
4. De uso especial como para el corte de engranajes

Las herramientas de corte que se usan en los cepillos son semejantes a las que se usan en los tornos. La figura 2.12 muestra herramientas de corte para diversas operaciones de maquinado que se llevan a cabo con el cepillo. La mayor parte de las herramientas de corte para cepillos sólo necesitan una pequeña cantidad de desahogo; por lo general de 3 a 5° para desahogo frontal y lateral. Los ángulos de inclinación laterales varían según el material que se esté maquinando. Para el acero se usa por lo general de 10 a 15°. El hierro colado necesita de 5 a 10° y el aluminio de 20 a 30° de inclinación lateral.

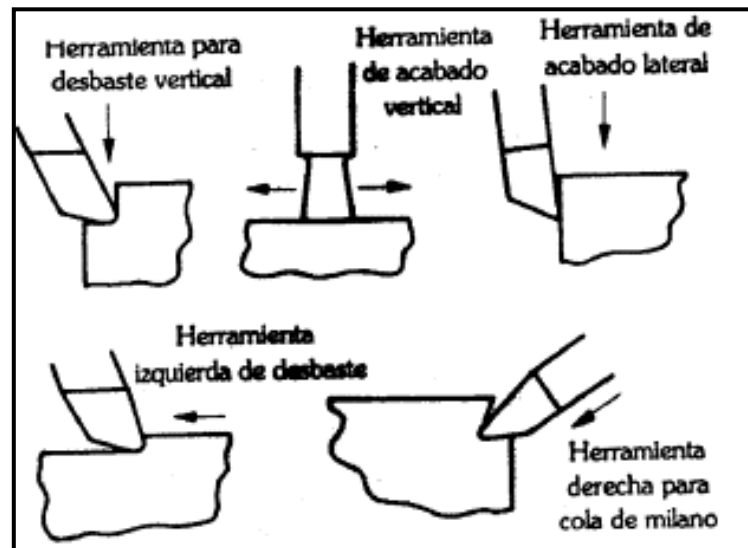


Figura 2. 12 Herramientas de corte para cepillos

Los portaherramientas que usan los cepillos de codo también se asemejan a los de los tornos. Sin embargo, el agujero cuadrado por el que pasa la herramienta es paralelo a la base en los portaherramientas para cepillo. Con frecuencia se usa el portaherramientas universal o de base giratoria. El portaherramientas universal se puede girar para cinco tipos distintos de cortes como se muestra en la figura 2.13.

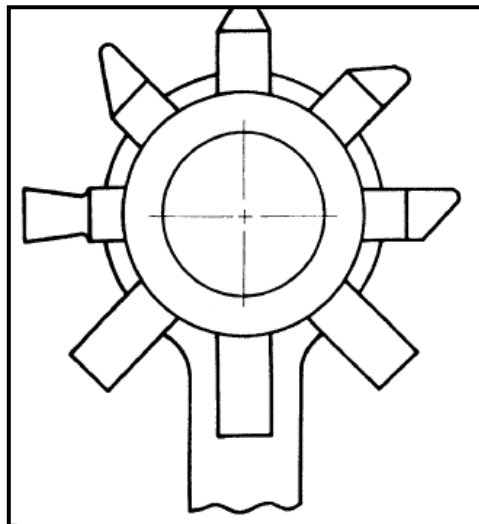


Figura 2. 13 Portaherramientas

En los cepillos se usan varios tipos de sujetadores de piezas. En cada tipo se necesita prensar la pieza en forma rígida. Si la pieza se mueve durante una operación, puede dañar seriamente al cepillo, o al operador.

La mayor parte de las piezas por maquinar en el cepillo se pueden sujetar en una prensa. Las barras paralelas se usan para soportar a la pieza sobre las quijadas de la prensa, en sentido paralelo a la mesa y parte inferior de la prensa. También se utilizan las bridas y los tornillos en T para fijar a las piezas o a las prensas sobre la mesa de trabajo. [32]

2.2.3.- Torno

Como máquina-herramienta el torno es, junto con la fresadora, la máquina más importante del taller mecánico. En este tipo de máquinas la pieza está sometida a un movimiento de rotación y se mecaniza por medio de una herramienta dotada de un movimiento de avance, que normalmente es paralelo al eje de rotación de la pieza.

El torneado como todas las demás elaboraciones efectuadas con máquina-herramienta, consiste en el arranque de material (viruta) de la pieza a elaborar. La



viruta es arrancada por una herramienta en la que están soldadas unas placas cortantes y estas deben ser de dureza superior a la del material a trabajar.

El giro rotatorio uniforme de la placa alrededor del eje de rotación permite un desprendimiento continuo y regular de material. La fuerza necesaria para el arranque del material es trabajada por la pieza en elaboración, mientras que la herramienta hace de reacción a esta fuerza, estando rígidamente fijada al portaherramientas.

Los principales componentes del torno son: a) bancada, b) cabezal, c) contrapunto, d) carro y e) portaherramientas. (Figura 2.14)

La bancada es el soporte principal del torno. Es la pieza más robusta y sirve de soporte para todos los demás componentes de la máquina. Normalmente su fabricación es en fundición y en los tornos pequeños, de una sola pieza. En la parte superior lleva el cabezal y el carro portaherramientas.

El cabezal se encuentra atornillado sobre el extremo izquierdo de la bancada, que se monta sobre una caja de fundición. Este cabezal contiene el eje principal, en cuyo extremo van los órganos de sujeción de la pieza y los engranajes de sujeción de la pieza y los engranajes de reducción, por medio de los cuales y de la fuerza desarrollada por el motor se imprime el movimiento de rotación a la pieza. Normalmente el eje de sujeción es hueco y va apoyado en cojinetes de bronce, que según la potencia del torno pueden ser de rodillos cónicos.

El contrapunto se encuentra en el extremo derecho y opuesto al cabezal, sobre las guías del torno, pudiéndose deslizar en toda su longitud. Está hecho de dos piezas generalmente de fundición, una de las cuales sirve de soporte y contiene las guías que se apoyan sobre las del torno y el dispositivo de fijación para inmovilizarlo.

El carro es la parte del torno que proporciona las herramientas y que con diversos movimientos de desplazamiento consiguen los efectos y las formas deseadas de las piezas.

El portaherramientas es, como su nombre indica, la parte del torno donde se sujetan las distintas herramientas para atacar la pieza a mecanizar. La fijación se realiza por medio de una brida, colocando las herramientas a la altura adecuada por medio de gruesos. [33]

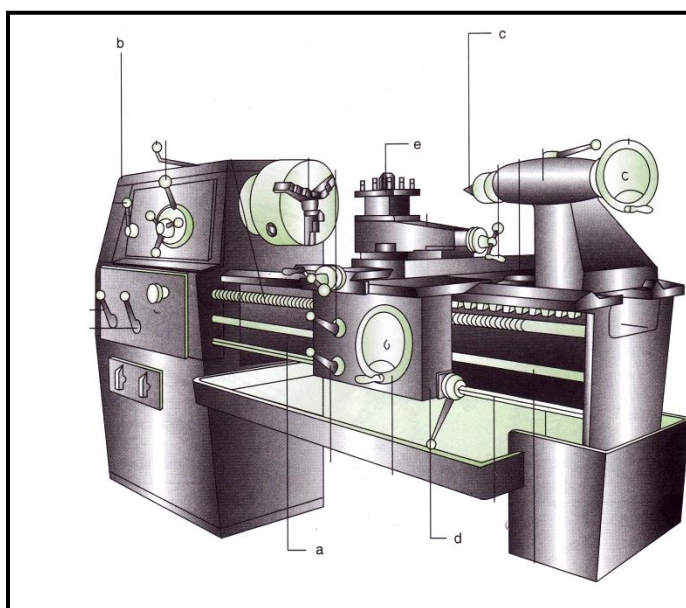


Figura 2. 14 Partes del torno; a) bancada, b) cabezal, c) contrapunto, d) carro y e) portaherramientas

2.2.3.1. - Torno CNC

El torno de control numérico, también conocidos como torno CNC es un tipo de máquina herramienta de la familia de los tornos que actúa guiado por una computadora que ejecuta programas controlados por medio de datos alfa-numéricos, teniendo en cuenta los ejes cartesianos X,Y,Z. (Figura 2.15)

Se caracteriza por ser una máquina herramienta muy eficaz para mecanizar piezas de revolución. Ofrece una gran capacidad de producción y precisión en el

mecanizado por su estructura funcional y porque los valores tecnológicos del mecanizado están guiados por el ordenador que lleva incorporado, el cual procesa las órdenes de ejecución contenidas en un software que previamente ha confeccionado un programador conocedor de la tecnología de mecanizado en torno.

En un sentido amplio se puede decir que un torno CNC, puede hacer todos los trabajos que normalmente se realizan mediante diferentes tipos de torno como paralelos, copiadores, revólver, automáticos e incluso los verticales pueden actuar con control numérico. Su rentabilidad depende del tipo de pieza que se mecanice y de la cantidad de piezas que se tengan que mecanizar en una serie. Por lo que es aconsejable realizar un estudio económico previo antes de decidir el tipo de torno donde se debe mecanizar una pieza. [34]

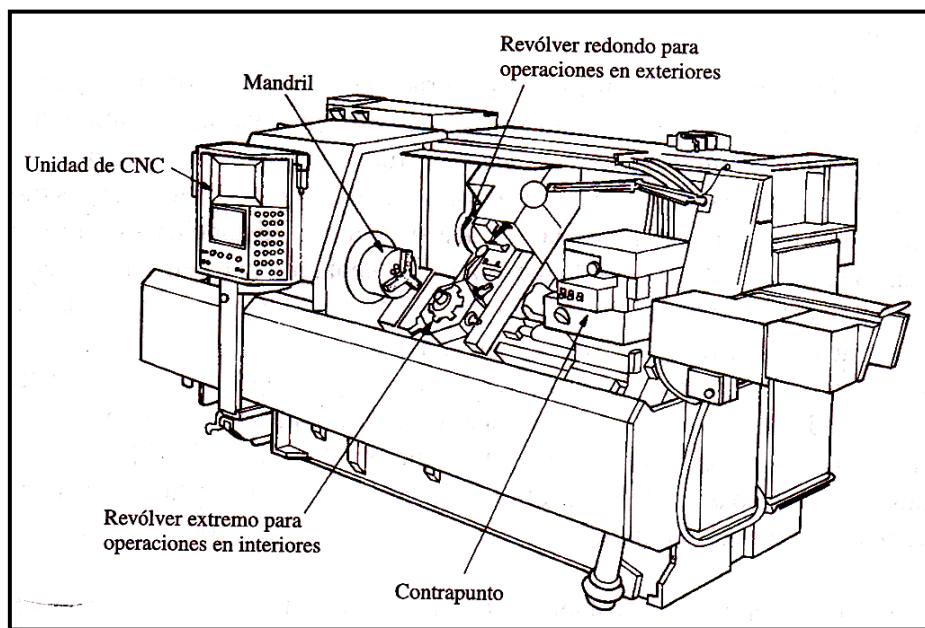


Figura 2. 15 Torno con control Numérico

2.3.- Maquinaria automatizada

La mayoría de los procesos tradicionales de maquinado quitan material formando virutas, o lo hacen por abrasión. No obstante, existen numerosos casos en



que estos procesos no son satisfactorios o simplemente no son posibles por alguna de las siguientes razones:

- La pieza es demasiado flexible o resulta difícil sujetar las partes
- La forma de la pieza es compleja
- El acabado superficial y la tolerancia dimensional son muy rigurosos
- El aumento de la temperatura y los esfuerzos residuales en la pieza no son deseables ni aceptables. [35]

Estos requisitos condujeron al desarrollo de métodos químicos, eléctricos, con láser y otros medios, para quitar el material. A partir de 1940 se comenzaron a usar estos métodos avanzados, a los que se les llamaba maquinado no tradicional o no convencional.

El seleccionar los procesos avanzados aplicados debidamente ofrece mayores ventajas técnicas y económicas que los métodos de maquinado tradicionales. [4]

Entre la maquinaria de procesos no tradicionales para la remoción de material se encuentran las siguientes:

- Máquina de electroerosión con alambre.
- Máquina de electroerosión sin alambre.
- Máquina de rayo laser.
- Máquina de chorro de agua mejor conocida como “water jet”.
- Máquina de plasma.

2.3.1.- Máquina de electroerosión

El proceso de electroerosión es uno de los procesos avanzados de maquinado que más se usan en la actualidad. Su principio de funcionamiento se basa en la erosión de los metales mediante chispas de descarga eléctrica. En la figura 2.16 se muestra el esquema de operación en el cual la herramienta de formado y la pieza

están conectadas a una fuente de corriente continua, ambas inmersas en un fluido dieléctrico (aceite mineral). Las funciones del mismo son actuar como aislante hasta cierta diferencia de potencial, limpiar y retirar desechos, y servir de refrigerante. Cuando la diferencia de potencial entre la herramienta y la pieza llega a un valor crítico, se descarga una chispa que atraviesa el fluido y quita una cantidad pequeña de metal de la superficie de la pieza.

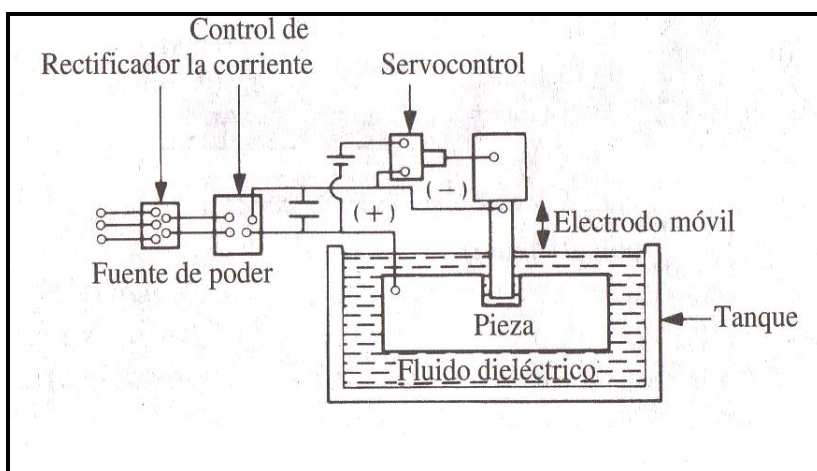


Figura 2. 16 Esquema del proceso de electroerosión

Durante el proceso de electroerosión la pieza y el electrodo se sitúan muy próximos, dejando un hueco que oscila entre 0,01 y 0,05 mm, por el que circula un líquido dieléctrico (normalmente aceite de alta conductividad). Al aplicar una diferencia de tensión continua y pulsante entre ambos, se crea un campo eléctrico intenso que provoca el paulatino aumento de la temperatura, hasta que el dieléctrico se vaporiza.

Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico salta la chispa, incrementándose la temperatura hasta los 20.000 °C, vaporizándose una pequeña cantidad de material de la pieza y el electrodo formando una burbuja que hace de puente entre ambas.

Al anularse el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos se



solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo.

Dependiendo de la máquina y ajustes en el proceso, es posible que el ciclo completo se repita miles de veces por segundo. También es posible cambiar la polaridad entre el electrodo y la pieza.[36]

La electroerosión se puede utilizar en cualquier material que sea conductor eléctrico y la dureza, tenacidad y resistencia del material no influyen sobre la velocidad de remoción.

Para controlarla, se puede variar la frecuencia de descarga o la energía por descarga así como el voltaje y la corriente.

Entre las aplicaciones más típicas se encuentra la producción de cavidades de matrices para componentes grandes de carrocerías automotrices. Se pueden lograr cortes y formado de partes muy complicadas con materiales duros. Mediante centros de maquinado controlados numéricamente se pueden lograr grandes producciones con alta precisión y repetibilidad aunque las herramientas y equipos son costosos. También se usa como proceso de rectificado y corte, pero para tener una producción económica a gran escala, el acabado superficial no debe ser muy fino.

2.3.1.1.- Máquina de electroerosión con alambre

Es una variación del proceso de electroerosión y también se lo conoce como electroerosión de hilo. En la figura 2.17 se puede ver como un alambre (que se mueve lentamente) describe una trayectoria predeterminada y corta la pieza. Las chispas de descarga funcionan como dientes de corte. El alambre suele ser de cobre o tungsteno y debe tener la resistencia tensil y tenacidad suficiente, así como gran conductividad eléctrica y capacidad de arrastrar los desechos producidos durante el corte.

Las máquinas de electroerosión con alambre de última generación poseen controles computarizados para regular la trayectoria de corte del alambre, tienen varios cabezales para cortar varias piezas simultáneamente e incluyen funciones de control para evitar la ruptura del alambre. Estas máquinas son extremadamente caras pero poseen la capacidad de cortar placas de hasta 30 cm de espesor.

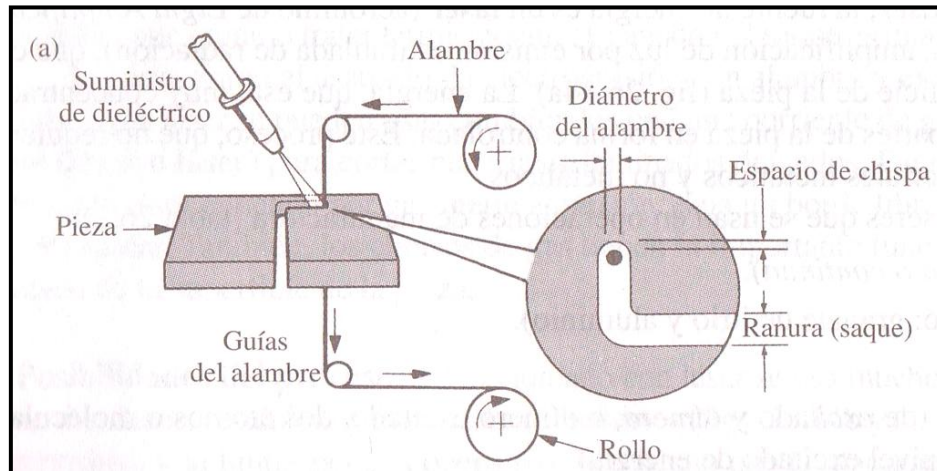


Figura 2. 17 Esquema del proceso de electroerosión con alambre

2.3.2.- Máquina de rayo láser

En este caso, la energía luminosa proveniente de una fuente láser se concentra sobre la superficie fundiendo y evaporando de forma controlada la pieza (figura 2.18). Los parámetros relevantes son la reflectividad y la conductividad térmica de la pieza, así como sus calores específicos y latentes de fusión y evaporación.

El maquinado con rayo láser se usa para taladrar y cortar metales, materiales no metálicos, cerámica y materiales compuestos y pueden cortar placas hasta de 32 mm. También se usan para soldar, para hacer tratamientos térmicos localizados y para marcar partes. Esta técnica se usa cada vez más en las industrias automotriz y electrónica compitiendo con el maquinado por electroerosión.

Como desventaja, se ve que la superficie obtenida por este método es áspera y tiene una zona afectada por el calor, que luego habrá que remover o tratar térmicamente. Además, los equipos involucrados son muy costosos y consumen mucha energía.

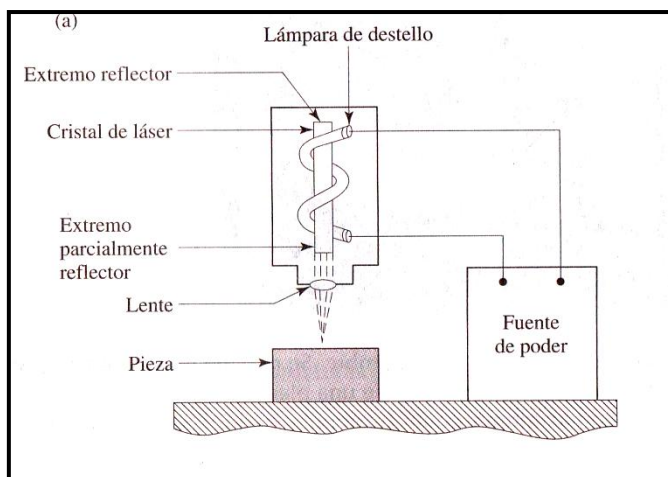


Figura 2. 18 Esquema del proceso de maquinado con láser

2.3.3.- Máquina de chorro de agua

En este método se utiliza la fuerza debida al cambio de la cantidad de movimiento del chorro en operaciones de corte y desbarbado. El chorro funciona como una sierra y corta una ranura angosta en la pieza (Figura 2.19).

Se pueden cortar materiales como madera, telas, ladrillos, cuero y papel de hasta 25 mm de espesor. Se usa para cortar tableros de instrumentación en automóviles, y algunas láminas de carrocería. Es una operación eficiente y limpia, y por eso se utiliza en la industria de alimentos para cortar productos alimenticios.

Este procedimiento muestra numerosas ventajas. Es adecuado para materiales flexibles (ya que no se producen flexiones) y las rebabas producidas son muy pequeñas. La pieza se humedece muy poco y puede iniciarse el corte en cualquier lugar sin necesidad de un hueco pretaladrado. Por último, no produce calor, y es un proceso seguro para el ambiente (aunque es muy ruidoso). [35]

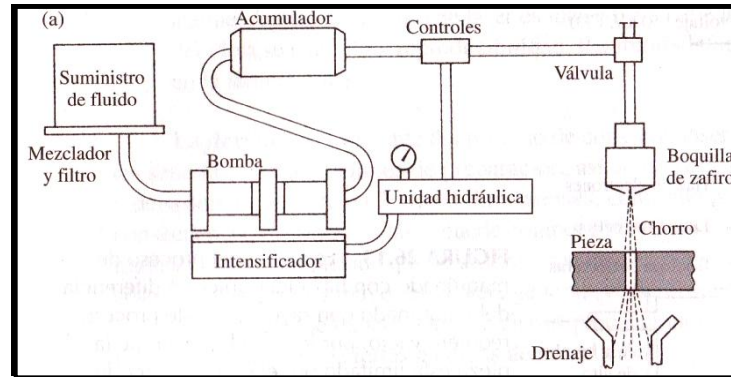


Figura 2. 19 Esquema del proceso de maquinado con chorro de agua

Cuando se usa esta máquina sobre partes metálicas, por lo general deben agregarse partículas abrasivas a la corriente a chorro para facilitar el corte. Por tanto este proceso se denomina corte con chorro de agua abrasiva. Entre los materiales abrasivos comunes están el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato); los tamaños del esmeril varían entre 60 y 120. Las partículas abrasivas se agregan a la corriente de agua a aproximadamente 0.5 lb/min (.23 Kg/min) después de que salen de la boquilla. [37]

Existen muchas ventajas con el corte con la tecnología de chorro de agua como las que siguen: no daña el medio ambiente, no crea polvo, no contamina el aire, y no es necesario el uso de petróleo u otras soluciones que pueden ser dañinas. [38]

2.4.- Optimización de procesos de corte

El volumen de producción y los costos se deben considerar en los procesos de producción de piezas. En la industria se debe optimizar el proceso maximizando la producción y minimizando los costos. Para lograr dicho objetivo es necesario considerar todos los costos y el tiempo requerido para maquinar una determinada pieza.



El tiempo del ciclo de producción de una pieza (maximización del ciclo de producción) depende de dos factores: 1) el acabado y la exactitud dimensional de la superficie y 2) de la cantidad de material por remover.

Para minimizar el costo por pieza se deben considerar dos factores: 1) la vida de la herramienta de corte, además 2) las fuerzas y potencia. La economía se puede conseguir cuando el acabado y la exactitud necesarios se logran al mínimo costo por unidad. Las herramientas desechables, insertos o plaquitas intercambiables, se pueden rotar para usar otro filo de corte, cuando se desgastan. [39]

Existen lineamientos de diseño para maquinado que se han recopilado de diversas fuentes:

- En lo posible, las partes deben diseñarse para que no necesiten maquinado. Si esto no es posible, entonces debe minimizarse la magnitud del maquinado requerido en la parte, en general, se logra un menor costo de producción mediante el uso de procesos de forma neta.
- Las tolerancias deben especificarse para satisfacer los requerimientos funcionales, pero también deben considerarse las capacidades de los procesos. Las tolerancias excesivamente cerradas aumentan el costo y puede ser que no añadan valor a la parte. Al hacerse más estrechas las tolerancias, los costos del producto se incrementan generalmente debido a procesamientos adicionales, equipamiento, inspección, reproceso y desperdicio.
- Deben evitarse las formas maquinadas como esquinas afiladas, bordes y puntas; estas son frecuentemente difíciles de lograr por maquinado. Las esquinas internas afiladas requieren herramientas de corte puntiagudas que tienden a romperse durante el maquinado. Las esquinas y bordes agudos tienden a crear rebabas y son peligrosas de maquinar. (Figura 2.20)
- Debe evitarse la perforación de agujeros profundos. El perforado de agujeros profundos requieren barras perforadas largas. Las barras deben ser rígidas y

esto requiere frecuentemente el uso de materiales con alto módulo, como carburos cementados, lo cual es costoso. (Figura 2.21).

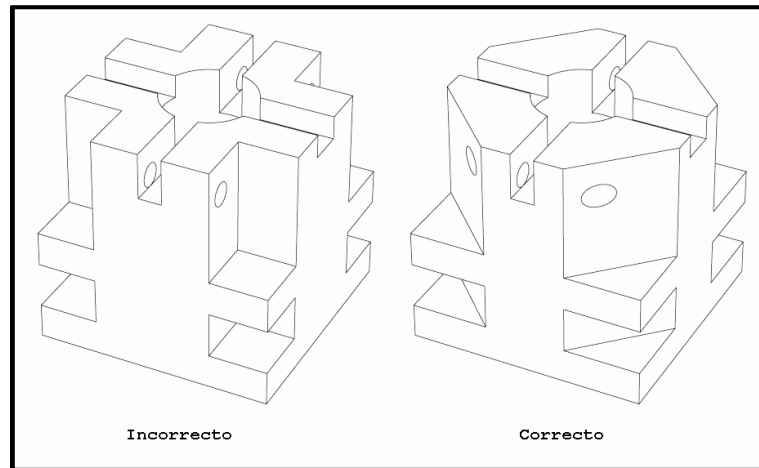


Figura 2. 20 Ejemplo de maquinado de piezas

- Deben evitarse las muescas porque requieren instalaciones adicionales, operaciones o herramientas especiales. También conducen a la concentración de esfuerzos en el servicio.
- Las partes maquinadas deben diseñarse con formas que se puedan producir con el mínimo número de ajustes, si es posible con un solo ajuste. Esto significa formas geométricas que puedan formarse desde un solo lado de la parte. [25]
- Las partes maquinadas deben diseñarse con formas que puedan lograrse con herramientas de corte estándar. Esto significa evitar tamaños no usuales de barrenos, roscas y características de formas extrañas que requieren herramienta de forma especial. Además, es conveniente diseñar partes que necesiten un número mínimo de cortes individuales en maquinado.

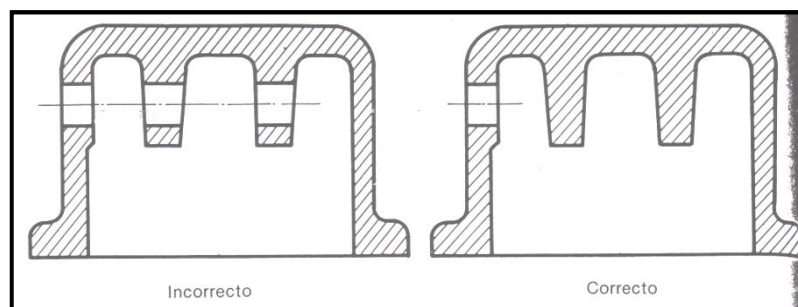
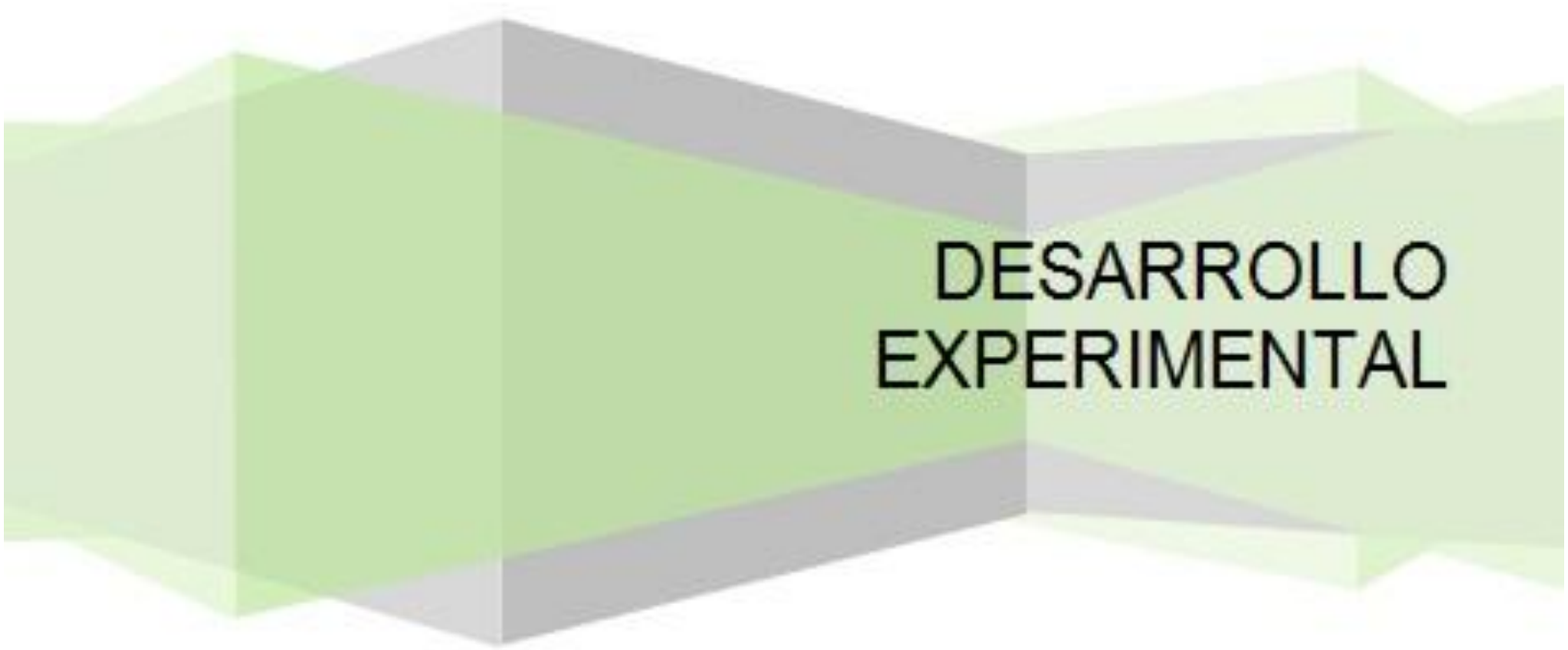


Figura 2. 21 Ejemplo de maquinado de barreno.

CAPÍTULO III



**DESARROLLO
EXPERIMENTAL**



3.1.- Desarrollo experimental

Para realizar el procedimiento de experimentación con el cual se logren determinar las principales variables que inciden en el proceso de desgaste del cortador, se realizará un análisis del proceso, identificando los factores que relacionan las variables y su comportamiento.

En el proceso de maquinado en torno convencional convergen una gran cantidad de variables que impactan en la vida útil de un cortador, no es el caso de un torno automatizado, dada la situación de que en este los procesos se pueden controlar a un nivel de muy alta precisión, esta característica nos da la oportunidad de poder realizar todo un proceso de experimentación controlada.

Como primer paso se caracterizarán todos los procesos involucrados así como sus variables y su correlación, para esta actividad se aplicarán las técnicas de diseño experimental (que se verán adelante).

Después de hacer la investigación del marco teórico, el primer paso para comenzar una experimentación es tener definida la metodología a seguir durante todo el proceso para tener un respaldo del análisis final.

Para el análisis experimental primero se tienen que fabricar piezas en la máquina de control numérico (HASS), variando algunos factores que influyen en la vida útil de la herramienta.

El material que se tiene utilizará para la pieza es un acero cold roll, éste se trabajará con herramientas como son cortadores o insertos de acero de alta velocidad (HSS por su nombre en inglés high speed steel).



3.1.1.- Variables a considerar

Para el experimento a realizar se necesitan tener definidas algunas variables que se deben controlar, entre ellas encontramos la velocidad de corte, la alimentación así como también la profundidad de corte, ya que de estas depende el grado de remoción de material y la fuerza requerida para cortar la pieza de trabajo, además que están relacionadas directamente con la vida útil de la herramienta.

Si se disminuye la velocidad del corte o la alimentación, el aumento en la vida de la herramienta será proporcionalmente mayor que la disminución de la velocidad del corte o de la alimentación.

Es más difícil penetrar un metal más duro y se requiere más energía para cortarlo. Estos factores alternadamente generarán una temperatura de corte más alta a cualquier velocidad de corte dada, haciéndola necesaria para utilizar una velocidad más reducida, porque la temperatura de corte se debe tener siempre dentro de los límites que puede sostener la herramienta de corte sin fallar.

La profundidad del corte será limitada por la cantidad de metal que deba ser maquinado, por la energía disponible en la herramienta de la máquina, por la rigidez del objeto y de la herramienta de corte, y por la rigidez del proyecto. La profundidad del corte tiene el menor efecto sobre la vida de la herramienta, así que la profundidad mayor de corte es la mejor para ser utilizada.

La energía disponible debe ser suficiente para hacer la profundidad requerida de corte en la alimentación seleccionada. Debe seleccionarse la alimentación máxima posible que produzca un acabado superficial aceptable.

Aunque existen tablas que recomiendan velocidades de corte y las alimentaciones para muchos materiales, la experiencia en maquinado con cierto



material puede formar la mejor base para ajustar las velocidades de corte dadas para un trabajo específico. Sin embargo, la profundidad del corte generalmente se debe seleccionar primero, seguido por la alimentación, y pasado la velocidad del corte.

La vida de la herramienta es el factor más importante de un sistema de maquinado, tanto para las alimentaciones y las velocidades no se pueden seleccionar números al azar, sino que se deben considerar con respecto a los muchos parámetros que influyen en la vida de la herramienta. [40]

3.2.- Determinación del proceso a través de un diseño experimental

Los métodos de diseño experimental tienen amplia aplicación en muchas disciplinas. En efecto, es posible considerar a la experimentación parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos. Por lo general este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas acerca de un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas conjeturas, que llevan a realizar nuevos experimentos, y así sucesivamente.

El diseño experimental es un medio de importancia crítica en el medio de la ingeniería para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura. La aplicación de técnicas de diseño experimental en una fase temprana del desarrollo de un proceso puede dar como resultado:

1. Mejora en el rendimiento del proceso.
2. Menor variabilidad y mayor apego a los requerimientos nominales del objetivo.
3. Menor tiempo de desarrollo.
4. Menores costos globales.



Existen diversos diseños de experimentos que se pueden seleccionar, pero varía el análisis experimental para cada tipo de investigación, a continuación se presentan los diseños más destacados.

3.2.1.- Factoriales

Muchos experimentos se llevan a cabo para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Puede mostrarse que en general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos.

El término experimento factorial o arreglo factorial hace referencia a la constitución de los tratamientos o combinaciones de tratamientos que se desean comparar.

En un experimento factorial se investigan simultáneamente los efectos de cierto número de diferentes factores. La necesidad de estudiar conjuntamente varios factores obedece principalmente a dos razones:

- a) Encontrar un modelo que describa el comportamiento general del fenómeno en estudio. Esto se restringe al rango de variación de los niveles de los factores.
- b) Optimizar la respuesta o variable independiente, es decir, encontrar la combinación de niveles de los factores que optimizan esa respuesta.

3.2.2.- Taguchi

A principios de la década de 1980, el profesor Genichi Taguchi introdujo su método para usar el diseño de experimentos en:

1. Diseño de productos o procesos de modo que sean robustos ante las condiciones ambientales.



2. Diseño/desarrollo de productos de modo que sean robustos a la variación de componentes.
3. Minimización de las variaciones respecto a un valor objetivo.

El profesor Taguchi propone una filosofía de la ingeniería de calidad que es ampliamente aplicable en el diseño de experimentos. El considera tres etapas en el desarrollo de un producto o proceso; diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias.

Recomienda el empleo de métodos estadísticos de diseño experimental para auxiliar el mejoramiento de calidad, en particular durante el diseño de parámetros y el diseño de tolerancias.

3.2.3.- Superficie de respuesta

La metodología de superficies de respuesta (RMS, por sus siglas en inglés) es un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas útiles para modelar y analizar problemas en los cuales una respuesta de interés es influida por varias variables, el objetivo es optimizar esta respuesta.

En la mayoría de los problemas de este tipo, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes se desconoce. Por ello, el primer paso en la RMS consiste en determinar una aproximación apropiada a la relación funcional real entre Y y el conjunto de variables independientes.

El objetivo eventual de la RMS consiste en determinar las condiciones de operación óptima para un sistema, o determinar la región del espacio de los factores en la que se satisfacen las condiciones de operación. [41]

3.3.- Operación de la CNC

La operación de la máquina CNC se da por medio del teclado que se encuentra en la figura 3.1, el cual se divide en 8 secciones que son: teclas de función, teclas de desplazamiento, teclas de anulación, teclas de pantalla, teclas del cursor, teclas alfanuméricas, teclas de modo y teclas numéricas. A continuación se describen las secciones.

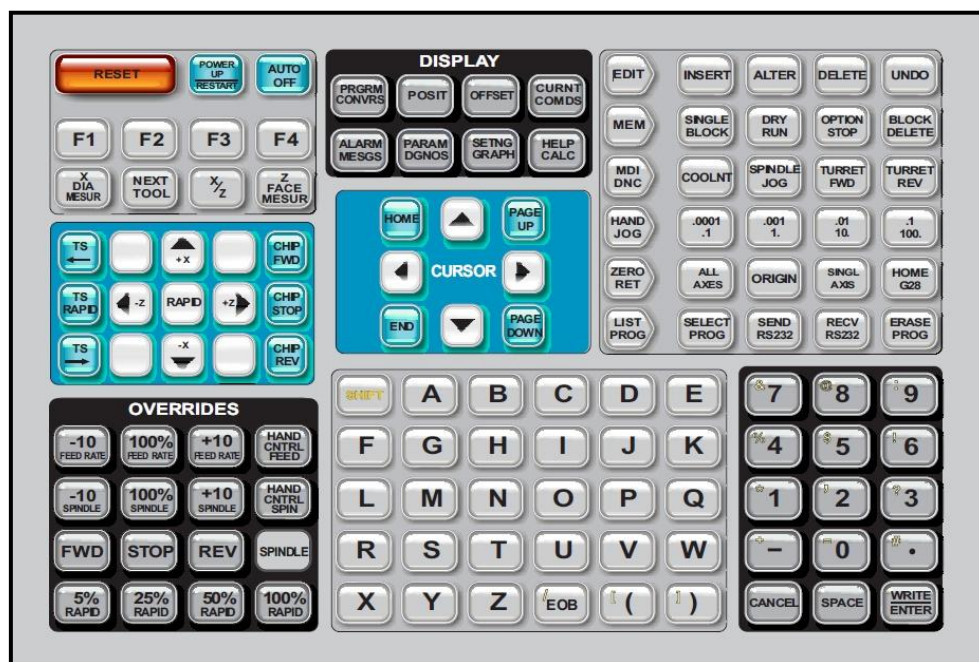


Figura 3. 1 Esquema de la pantalla dividida en 8 secciones

Teclas de función:

Power On (Encender)- Enciende la máquina.

Power Off (Apagar)- Apaga la máquina.

Cycle Start (Inicio de Ciclo) - Inicia un programa. Este botón se utiliza también para iniciar un programa en modo Gráficos.



Feed Hold (Detener Avance) - Detendrá el movimiento de todos los ejes.

Reset (Reiniciar) - Esto detendrá la máquina (los ejes, el husillo, la torreta y la bomba de refrigeración son detenidas).

Power Up (Encender) / Restart (Reiniciar) - Cuando se presiona esta tecla, los ejes vuelven a la posición cero de la máquina y puede ocurrir un cambio de herramienta.

Auto Off (Auto Apagado) - Automáticamente posiciona los ejes al cero de la máquina y prepara la máquina para apagarla.

Teclas F1- F4 – Estos botones presentan diferentes funciones dependiendo del modo de operación. Por ejemplo, F1-F4 producirá una acción diferente en modo Edición, que en modo Programa, o que en modo Desplazamiento.

X Dia Mesur (Medición del diámetro X) (X Diameter Measure) – Usado para grabar los cambios de desplazamiento de la herramienta en el eje X en la página de desplazamiento durante el establecimiento de la pieza o parte.

Next Tool (Herramienta Siguiente) – Se usa para seleccionar la herramienta siguiente de la torreta (normalmente utilizado durante el montaje de la pieza).

X/Z – Usada para intercambiar entre las modalidades de desplazamiento de los ejes X y Z durante el montaje de la pieza.

Z Face Mesur (Medición de la Cara Z) (Z Face Measure) – Usado para grabar los cambios de desplazamiento de la herramienta en el eje Z en la página de desplazamiento durante el establecimiento de la pieza o parte.



Teclas de desplazamiento:

Chip FWD (Adelante) (Chip Auger Forward) - Inicia el transportador de virutas opcional en la dirección “forward” (Adelante), moviendo las virutas fuera de la máquina.

Chip Stop (Detener) (Chip Auger Stop) - Detiene el transportador de virutas.

Chip REV (Atrás) (Chip Auger Reverse) - Inicia el transportador de virutas opcional en la dirección “reverse” (Atrás), lo que es útil al limpiar atascos y restos del transportador.

X/-X y Z/-Z (teclas de eje) - Permite al operador desplazar manualmente el eje manteniendo presionado el botón individual o pulsando el eje deseado y utilizando la manija de desplazamiento.

Rapid (Rápido) - Cuando se presiona simultáneamente una de las teclas de arriba (X+, X-, Z+, Z-), ese eje se moverá en la dirección seleccionada a la máxima de velocidad de desplazamiento.

←TS – Presionando esta tecla se mueve el cabezal móvil hacia el husillo.

TS Rapid (Rápido) – Aumenta la velocidad del cabezal móvil cuando se presiona simultáneamente con una de las otras teclas de control del cabezal móvil.

→TS – Presionando esta tecla se mueve el cabezal móvil lejos del husillo



Teclas de anulación:

Estas teclas permiten al usuario anular la velocidad del movimiento rápido transversal, la velocidad programada de avance y las velocidades del husillo.

-10 - Reduce la tasa de avance un 10%.

100% - Establece la velocidad de avance del control a la velocidad programada por el usuario..

+10 - Incrementa la tasa de avance un 10%.

Hand Cntrl Feed (Control de la Tasa de Avance) (Handle Control Feedrate) - Al presionar este botón se permite a la manija de desplazamiento ser utilizada para controlar la tasa de avance en incrementos de $\pm 1\%$.

Hand Cntrl Spin (Control del Husillo) (Handle Control Spindle) - Al presionar este botón se permite a la manija de desplazamiento ser utilizada para controlar la velocidad del husillo en incrementos de $\pm 1\%$.

FWD (Adelante)- Inicia el husillo en la dirección hacia adelante (igual a las manecillas del reloj).

REV (Atrás) - Inicia el husillo en la dirección hacia atrás (contraria a las manecillas del reloj). El husillo puede ser iniciado o detenido con los botones FWD o REV en cualquier momento en el que la máquina se encuentre en una parada bloque único o en el que se haya presionado el botón free hold (parada del avance). Cuando el programa es reiniciado con el inicio de ciclo, el husillo volverá hasta la velocidad definida previamente.

STOP (Parar) - Detiene el husillo.



5% / 25% / 50% / 100% Rapid (Avance Rápido) - Limita el avance rápido al valor de la tecla.

Teclas de pantalla:

Las teclas de pantalla permiten el acceso a las diferentes pantallas, la información del funcionamiento y las páginas de ayuda. Algunas de estas teclas muestran pantallas diferentes al ser pulsadas más de una vez.

Prgm/Convrs (Programa/Conversación) - Muestra el programa seleccionado en ese momento. Si se presiona el botón dos veces entrará en la funcionalidad Quick Code (Código Rápido), y si se presiona tres veces accederá a la funcionalidad Visual Quick Code (Código Rápido Visual).

Posit (Posición) (Position) - Muestra las posiciones de los ejes de la máquina. Al presionar los botones Page Up/Down se mostrarán al operario, con letras grandes, los formatos de la máquina, trabajo y la distancia por recorrer.

Offset (Desplazamiento) - Muestra la geometría longitudinal de la herramienta, los desplazamientos en los radios, los desplazamientos del desgaste y la posición del refrigerante.

Curnt Comds (Comandos Actuales) (Current Commands) - Muestra los detalles del programa actual (por ejemplo los códigos G, M, H y T), información de la carga del husillo y las posiciones de los ejes de la máquina mientras se ejecuta el programa.

Alarm / Mesgs (Alarmas / Mensajes) (Alarms / Messages) - Muestra el visor de alarmas y las pantallas de mensajes. El usuario puede luego desplazarse por las alarmas presionando las teclas con la flecha hacia arriba o abajo. Presionando una segunda vez mostrará una página para las notas y mensajes del usuario. Si hay un



mensaje, cada vez que se encienda la máquina se mostrará la página de mensajes. Los mensajes son mostrados al encender hasta que son eliminados.

Param / Dgnos (Parámetros / Diagnóstico) (Parameters / Diagnostics) - Muestra los parámetros que definen el funcionamiento de la máquina. Los parámetros son establecidos en la fábrica y no deberían ser modificados por el usuario. Al pulsar por segunda vez la tecla se mostrará la primera página de datos de diagnóstico. Esta información se utiliza principalmente para la detección de problemas realizada por un técnico de mantenimiento certificado por Haas. La primera página de diagnóstico incluye las entradas y salidas discretas.

Setng / Graph (Ajustes / Gráficos) (Settings / Graphics) - Muestra y permite el cambio de los ajustes del usuario. Presionando la tecla una segunda vez habilita el modo Gráficos. En el modo Gráficos el usuario puede ver la trayectoria generada por el programa para la herramienta y, si es necesario, depurar el programa antes de ejecutarlo

Help / Calc (Ayuda / Calculadora) (Help / Calculator) - Muestra un manual abreviado. En este manual en pantalla hay descripciones breves de los códigos G y M, definiciones de las funcionalidades de control, localización de problemas e incidencias de mantenimiento. Al presionar por segunda vez se mostrará la calculadora de ayuda.

Teclas del cursor:

Las teclas del cursor permiten al usuario trasladarse a través de varias pantallas y campos en el control. Y son utilizadas en la edición de programas CNC.

Home (Inicio) - Este botón moverá el cursor al elemento situado más arriba en la pantalla; al editar, es el bloque arriba a la izquierda del programa.



Up / Down Arrows (Flechas Arriba / Abajo) - mueve un elemento, un bloque o un campo hacia arriba/abajo.

Page Up / Down (Página Arriba / Abajo) - Utilizado para cambiar pantallas o para mover arriba/abajo una página cuando se visualiza un programa.

Left Arrow (Flecha Izquierda) - Utilizada para seleccionar individualmente elementos editables cuando se ve un programa; mueve el cursor a la izquierda. Se utiliza para desplazarse a través de las selecciones de ajustes y mueve la ventana de ampliación a la izquierda en el modo de gráficos.

Right Arrow (Flecha Derecha) - Utilizada para seleccionar individualmente elementos editables cuando se ve un programa; mueve el cursor a la derecha. Se utiliza para desplazarse a través de las selecciones de ajustes y mueve la ventana de ampliación a la derecha en el modo de gráficos.

End (Fin) - Este botón generalmente mueve el cursor hasta el elemento situado más abajo en la pantalla. Durante la edición, será hacia el bloque o línea final del programa.

Teclas alfabéticas:

Las teclas alfabéticas permiten al usuario introducir las letras del alfabeto junto con algunos caracteres especiales. Algunos de los caracteres especiales se introducen presionando primero la tecla “shift”.

Shift (Cambio) - La tecla de cambio permite el uso de caracteres adicionales en el teclado. Los caracteres adicionales se ven en la parte superior izquierda de algunas de las teclas alfanuméricas.



EOB - Este es el caracter End-Of-Block (Fin de Bloque). Aparece como un punto y coma (;) en la pantalla e indica el final de una línea de programa.

() - Los paréntesis se usan para separar los comandos de CNC y los comentarios del usuario en un programa.

/ - La barra se usa en la funcionalidad Borrar Bloque y en expresiones Macro.

[] - Los corchetes se usan en funciones macro.

Estas teclas cambian el estado de operación de la máquina de herramientas CNC. Una vez que se presione un botón de modo, los botones en la misma fila estarán disponibles para el usuario. El modo vigente siempre aparecerá en la línea superior y a la derecha de la pantalla vigente en esos momentos.

Edit (Editar)- Selecciona el modo de edición. Esta página se utiliza para editar programas en la memoria de control.

Insert (Insertar) - Al pulsar este botón se introducirán comandos al programa en el cursor. Este botón también insertará texto desde el portapapeles en la posición actual del cursor, y puede ser utilizado también para copiar bloques de código en un programa (Véase la sección Editor Avanzado).

Alter (Alterar) - Al pulsar este botón se cambiará el comando o texto resaltado por el nuevo comando o texto introducido. Este botón cambiará también las variables resaltadas por el texto almacenado en el portapapeles, o moverá un bloque seleccionado a una nueva posición.

Delete (Borrar) - Borra el elemento en el que está el cursor, o borra un bloque de programa seleccionado.



Undo (Deshacer) - Retrocede o Deshace hasta los últimos 9 cambios hechos en la edición, y deselecta un bloque resaltado.

MEM (Memoria) (Memoria) - Selecciona el modo de memoria. Esta página muestra el programa seleccionado actualmente en el control.

Single Block (Bloque Único) - Apaga o enciende bloque único. Cuando bloque único está encendido, únicamente se ejecuta un bloque del programa, cada vez que se presione Cycle Start (Inicio de Ciclo).

Dry Run (Ensayo) - Se usa para verificar el movimiento real de la máquina sin cortar una pieza.

Opt Stop (Parada Opcional) (Parada Opcional) - Activa o desactiva las paradas opcionales.

Block Delete (Borrar Bloque) - Activa o desactiva la función borrar bloque.

MDI/DNC - El modo MDI es el modo de “Entrada Manual de Datos” cuando un programa puede ser escrito pero no es introducido en la memoria. El modo DNC, “Control Numérico Directo”, permite introducir a “cuentagotas” programas grandes en el control, para que puedan ser ejecutados (Véase la sección del modo DNC).

Coolnt (Refrigerante) (Refrigerante) - Enciende y apaga el líquido refrigerante opcional.

Spindle Jog (Desplazar Husillo) - Gira el husillo a la velocidad seleccionada en el Ajuste 98 (Desplazamiento del husillo en RPM, Revoluciones Por Minuto).



Turret FWD (Torreta hacia adelante) - Gira la torreta de herramientas hacia adelante hasta la siguiente herramienta en la secuencia. Si se introduce Tnn en la línea de entrada de datos, la torreta avanzará hacia la dirección de la herramienta nn.

Turret REV (Torreta hacia atrás) - Gira la torreta de herramientas hacia atrás hasta la herramienta anterior. Si se introduce Tnn en la línea de entrada de datos, la torreta avanzará en la dirección contraria a la herramienta nn.

Handle Jog (Manija de Desplazamiento) - Selecciona el modo de desplazamiento del eje .0001, .1 - 0.0001 pulgadas (.001 mm) para cada división en la manija de desplazamiento.

.0001/.1, .001/.1, .01/10., .1/100. - El primer número (número superior), en modo pulgadas, selecciona la cantidad a desplazarse en cada clic de la manija de desplazamiento. El segundo número (número en la parte de abajo) se utiliza en modo ensayo y sirve para seleccionar la velocidad del avance y de los movimientos del eje.

Zero Ret (Retorno a cero) (Retorno a Cero) - Selecciona el modo retorno a cero, que muestra la localización del eje en cuatro categorías distintas, que son; Operador, Trabajo G54, Máquina y Dist (distancia) a recorrer.

All Axes (Todos los Ejes) - Busca el cero de la máquina para todos los ejes. Es similar a Power Up/Restart (Encender/Reiniciar) salvo en que no se produce un cambio de herramienta.

Origen (Origen) - Pone a cero las pantallas y cronómetros seleccionados.

Singl Axis (Eje Único) (Eje Único) - Pone a cero un eje. Pulse sobre la letra del eje que desee poner a cero y apriete el botón Singl Axis (Eje Único).



Home G28 - Retorna rápidamente todos los ejes al cero de la máquina.

List Prog (Listar Programas) (Listar Programas) - Muestra los programas almacenados en el control.

Select Prog (Seleccionar Programa) - Hace que el programa que aparece resaltado en la lista de programas sea el programa vigente.

Send RS-232 (Enviar por RS-232) - Transmite programas a través del puerto serie RS232.

Recv RS-232 (Recibir por RS-232) - Recibe programas desde el puerto serie RS232.

Erase Prog (Borrar Programa) - Borra el programa que aparece resaltado en el modo Memory (Memoria) o el programa completo en modo MDI.

Teclas numéricas:

Las teclas numéricas le permiten al usuario introducir números y algunos caracteres especiales en el control.

Cancel (Cancelar) - La tecla cancelar se usa para borrar el último carácter introducido.

Space (Espacio)- Se utiliza para dar formato comentarios dentro de los programas o en el área de mensajes.

Write / Enter (Escribir / Introducir) - Tecla de entrada de propósito general.

3.3.1.- Sistema de coordenadas y ejes de la máquina CNC.

Para la programación y operación de la máquina CNC se necesitan conocer las coordenadas y ejes con que opera. Por eje se entiende cualquier movimiento de la máquina que realice un posicionamiento. Mediante el movimiento combinado de dos o más ejes es posible describir todo tipo de trayectorias o interpolaciones en el plano o en el espacio.

La herramienta puede moverse en dos direcciones, en donde X es la profundidad (adentro y afuera) y Z el avance (movimiento de la plataforma).

En el siguiente diagrama se muestran los ejes y el punto de referencia de la pieza que es llamado “cero absoluto”. (Figura 3.2)

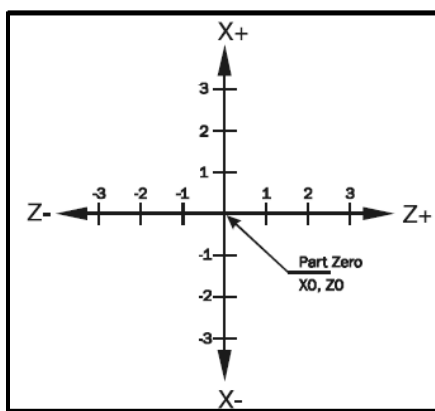


Figura 3. 2 Ejes de la CNC

La figura anterior muestra incrementos numerados en ambos lados del cero absoluto, este puede estar situado en cualquier parte a lo largo de la pieza de trabajo. Hay que recordar que una vez localizado el cero de la pieza, los incrementos hacia un lado son negativos y hacia el otro lado positivos.

En el caso de la máquina se adecuan de acuerdo a la trayectoria de los ejes (Figura 3.3), es fácil saber si el movimiento en Z es positivo o negativo, pero en el caso del eje x, los incrementos hacia el operador son negativos y en el sentido contrario son positivos.[42]

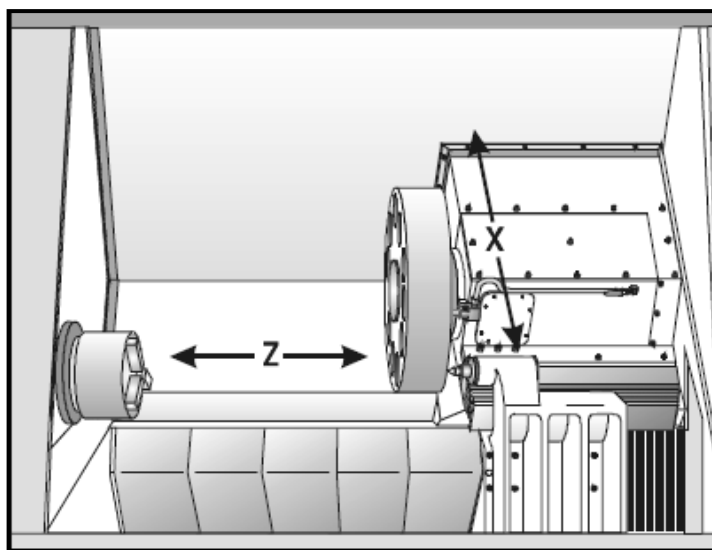


Figura 3. 3 Máquina CNC

3.4.- Programación de la CNC

El funcionamiento de la CNC requiere de un programa diseñado e introducido a la memoria del control. La manera más común de escribir un programa es fuera del CNC, en un equipo donde se pueda almacenar el programa y posteriormente se lo pueda enviar al control de la máquina CNC. La manera en que se introduce un programa al control del CNC es por medio de una interconexión RS-232, a partir de ahí, el control almacena este programa aún después de apagar la máquina.

Hoy en día es generalizado el uso del diseño gráfico por computadora en la mayoría de las industrias se utilizan los paquetes de computo CAD para hacer sus planos y diseños gráficos de piezas y productos, esta información se graba en memoria y si posteriormente se necesita el plano y diseño se genera otra impresión tantas veces se requiera. Esta idea actualmente es una realidad, la integración del



diseño gráfico con la manufactura automatizada se realiza a través de convertir todas las entidades geométricas (líneas, círculos, perfiles, barrenos, cavidades, roscas etc.) contenidas en un dibujo computarizado en comandos de corte y movimiento, así como la activación de cambios automáticos de herramientas encendido y apagado del giro de la herramienta, bomba de refrigerante, compensaciones de diferentes herramientas, y hasta la misma consideración de materiales diferentes lo que implica ajustes en velocidades y avances de corte. Con todo este cruce de información se genera automáticamente un programa en formato ya sea APT o en código maquina G/M, el cual será ejecutado por la máquina de control numérico para fabricar la pieza que se dibujo previamente en un CAD. A este sistema de conversión de gráficos a programa de Control Numérico se conoce como sistema CAM (Manufactura Asistida por Computadora).

3.4.1.- Antecedentes de la programación

Antes de la década de los 50 existían dos métodos de producción en la industria de transformación: La producción a volumen mediano, la cual era soportada en procesos realizados en máquinas de operación manual y con velocidades de producción bajas, pero con capacidad de fabricar diversos productos (Diseños diferentes), y la producción a alto volumen, realizada en líneas automatizadas, pero únicamente se podía producir un solo producto con altas velocidades de producción, desde luego que las máquinas eran costosas y hechas exclusivamente para ese proceso, como eran máquinas hechas a la medida su compra se justifica si los volúmenes de producción eran altos para solventar la inversión.

Las máquinas automatizadas de producción se caracterizaban por contener procesos controlados por sistemas hidráulicos, neumáticos, electromecánicos los cuales ofrecían gran dificultad para hacer modificaciones ya que usaban levas o interruptores de limite diseñados para realizar un proceso secuenciado de operaciones sobre la máquina, y cualquier cambio en el diseño de la pieza requería del cambio de estos elementos, muchos fueron los casos en que una máquina automatizada no podía ser usada para fabricar una parte rediseñada.



Así se requería de un nuevo sistema que en vez de toda una serie de elementos actuaran sobre la pieza, desde la sujeción hasta el proceso mismo, y más bien se requería que de corte o proceso debería seguir al perfil de la pieza buscándola para hacer el trabajo sin la intervención del operador. Después de la segunda Guerra Mundial se demandó más variedad de productos, componentes, subensambles en una amplia variedad de formas y diseños más complicados, desde luego esto dificultó aun más los procesos automatizados de corte. Se necesitaba un nuevo sistema de control que pudiera procesar señales a alta velocidad para mantener de forma continua y simultánea la herramienta de corte en movimiento y con alto grado de exactitud. La aparición de la primera computadora digital a finales de los 40's ofreció la posibilidad para desarrollar un nuevo tipo de control.

Se sabe que el éxito de las máquinas de control numérico dependió de 2 elementos: La mejora del controlador electrónico y la programación. El controlador necesita para fabricar una pieza o producto, una serie de instrucciones, esto es de un programa que indique paso por paso los procesos de fabricación que se van a realizar sobre la pieza, este programa requiere estar escrito en un código y después ser almacenado o grabado en un medio, para ser transmitido al controlador a través de un lector, los primeros lectores fueron a través de cintas perforadas y la información contenida en esta se transfería a la memoria del controlador por medio de un lector óptico.

Ante la complejidad cada vez más grande en los diseños de los productos o piezas, se necesitaría tarde o temprano de un sistema de computo con mucha más capacidad en memoria, fue así que se desarrollaron procedimientos de comunicación entre computadoras y el controlador al grado de que actualmente se puede estar enviando el código de un programa muy extenso y este simultáneamente se estará ejecutando en la fabricación del producto o pieza, a este procedimiento se le conoce como DNC (control numérico directo). Este concepto nació desde 1955 cuando en el MIT se logró integrar la computadora Whirwind a una máquina CN.



En 1957 la asociación de Industria Aeroespacial y en coordinación desde luego con el MIT se propusieron desarrollar un sistema de programación que pudiera utilizarse en todas las máquinas CN, es así que en 1958 nace el APT (Automatically Programmed Tool) este programa se diseñó para ser usado en una computadora IBM, se transfirió finalmente a la industria en 1960. El lenguaje APT realiza movimientos de herramienta de posicionamiento o corte en los 3 ejes a través de una descripción “casi literal” de la geometría de la pieza, generando las rutas de corte y así como las especificaciones del proceso maquinado como RPM y avances, este tipo de programación se diseñó con la idea de realizar procesos de corte para superficies en un espacio tridimensional y no operaba adecuadamente en muchas operaciones sencillas relacionadas con movimientos lineales en un solo plano.

El advenimiento de la tecnología computacional transformó y abarató y a la vez hizo más confiable el controlador electrónico de las máquinas de control numérico. Cuando se usó la tecnología ROM (Memoria en sólo lectura) se pudieron almacenar programas de aplicación específica, es precisamente ahí donde se inicia el concepto CNC (control numérico computarizado), con este sistema de almacenamiento de datos se pudieron grabar una gran cantidad de rutinas de fabricación.

Posteriormente se instalaron subrutinas preprogramadas llamados ciclos enlatados, estas rutinas fueron grabadas en memoria ROM, ofreciendo la oportunidad de ejecución de un programa desde memoria lo cual ofreció ventajas de edición y a la vez disminuyó los errores por lectura de las cintas perforadas.

Hoy en día la programación en código G y M para fabricar una pieza es una actividad común y rutinaria en la industria. Los fabricantes de las máquinas de control numérico han trabajado intensamente para simplificar la actividad de programación de tal forma que se han integrado muchos ciclos preprogramados que realizan los procesos de forma automática principalmente en lo referente a las rutinas de



barrenado, roscado y cavidades circulares, desde luego esto ha sido de gran ayuda para la fabricación de piezas más complejas, pero conforme avanza la competitividad industrial surge una gran variedad de diseños y formas cada vez más sofisticados lo cual ha hecho más complicados los procesos de corte que deberán generar superficies irregulares. [43]

3.4.2.- Códigos "G"

Los códigos G se emplean para ordenar acciones específicas para la máquina, por ejemplo movimientos simples de la máquina o la función de taladro. También ordenarán funcionalidades más complejas que pueden involucrar herramientas activas opcionales y el eje C.

Los códigos G se dividen en grupos. Cada grupo de códigos sirve para un objetivo específico. Un código G del mismo grupo puede ser sustituido por otro código G en el mismo grupo. De esta manera se establecen los modos de operación. La regla universal es que los códigos de un mismo grupo no puede utilizarse más de una vez en la misma línea.

La siguiente es una lista de los códigos G de HASS con sus respectivos números de grupo:

G00 Posicionamiento con movimiento rápido (Grupo 01)

G01 Movimiento de interpolación lineal (Grupo 01)

G02 Movimiento de Interpolación circular CW (sentido de las agujas del reloj) / G03 Movimiento de interpolación circular CCW (sentido contrario a las agujas del reloj) (Grupo 01)

G04 Pausa (Grupo 00)

G05 Movimiento fino del control del husillo (Grupo 00)

G09 Parada exacta (Grupo 00)



- G10 Establecer desplazamientos (Grupo 00)
- G14 Cambio de husillo principal / G15 Cancelar (Grupo 17)
- G17 Plano XY, G18 Plano ZX y G19 Plano YZ (Grupo 02)
- G18 Selección del plano ZX (Grupo 02)
- G20 Seleccionar pulgadas / G21 Seleccionar sistema métrico (Grupo 06)
- G28 Retorno a la posición cero de la máquina, establecer G29 punto de referencia opcional (Grupo 00)
- G29 Movimiento desde punto de referencia (Grupo 00)
- G31 Saltar función (Este código G es opcional y requiere una sonda) (Grupo 00)
- G32 Corte de rosca (Grupo 01)
- G40 Cancelar la compensación de la punta de la herramienta (Grupo 07)
- G41 Compensación de la herramienta (TNC) Izquierda / G42 TNC Derecha (Grupo 07)
- G50 Establecer el desplazamiento de una coordenada FANUC, YASNAC (Grupo 11)
- G51 Cancelar desplazamientos (YASNAC) (Grupo 11)
- G52 Establecer sistema de coordenadas locales FANUC (Grupo 00)
- G53 Selección de coordenadas de la máquina (Grupo 00)
- G54-59 Selección de sistema de coordenadas del #1 al #6 (Grupo 12)
- G61 Modalidad de alto exacto (Grupo 13)
- G64 Cancelar G61(Selección de la Modalidad de corte normal) (Grupo 13)
- G70 Finalizar ciclo (Grupo 00)
- G71 Ciclo para remover material de los O.D./I.D. (Diámetros exteriores/interiores) (Grupo 00)
- G72 Ciclo para remover material del final de la cara (Grupo 00)
- G73 Ciclo para retirar material de una trayectoria irregular (Grupo 00)
- G74 Taladrado con avances cortos, Ciclo de ranurado del final de la cara (Grupo 00)
- G75 Ciclo de ranurado de los O.D./I.D. (Diámetros Ext./Interiores) (Grupo 00)
- G76 Ciclo cortador para hacer una rosca exterior, Pases múltiples (Grupo 00)
- G77 Ciclo de aplanado (Este código G es opcional y es usado para herramienta vivas) (Grupo 00)
- G80 Cancelar el ciclo preprogramado (Grupo 09)



- G81 Ciclo preprogramado de taladrado (Grupo 09)
- G82 Ciclo preprogramado de reboreado (Grupo 09)
- G83 Ciclo preprogramado de taladrado usando avances cortos (Grupo 09)
- G84 Ciclo preprogramado de roscado (Grupo 09)
- G85 Ciclo preprogramado de barrenado (Grupo 09)
- G86 Ciclo preprogramado de barrenado y alto (Grupo 09)
- G87 Ciclo preprogramado de barrenado y retroceso manual (Grupo 09)
- G88 Ciclo preprogramado de barrenado y pausa y retroceso manual (Grupo 09)
- G89 Ciclo preprogramado de barrenado y pausa (Grupo 09)
- G90 Ciclo de torneado de los O.D. / I.D. (Diámetros exteriores/interiores) (Grupo 01)
- G92 Ciclo de roscado (Grupo 01)
- G94 Ciclo de corte del final de la cara (Grupo 01)
- G95 Roscado rígido con herramientas vivas (Cara) (Grupo 09)
- G96 Encendido de la velocidad constante en la superficie (Grupo 12)
- G97 Apagado de la velocidad constante en la superficie (Grupo 12)
- G98 Avance por minuto (Grupo 05)
- G99 Avance por revolución (Grupo 05)
- G100 Deshabilitar la imagen del espejo (Grupo 00)
- G101 Habilitar la imagen del espejo (Grupo 00)
- G102 Salida programable al RS-232 (Grupo 00)
- G103 Límite previsor de bloques (Grupo 00)
- G110, G111 y G114-G129 Sistema de coordenadas (Grupo 12)
- G112 Interpretación XY a XC (Grupo 00)
- G113 Cancelar G112 (Grupo 00)
- G154 Seleccionar coordenadas de trabajo P1-99 (Grupo 12)
- G184 Ciclo preprogramado de roscas para roscas a la izquierda (Grupo 00)
- G186 Roscado rígido con herramientas vivas (Cara) (Grupo 00)
- G187 Control de precisión (Grupo 00)
- G195 Roscado radial con herramientas vivas (Diámetro) (Grupo 00)
- G196 Roscado vectorial reversa con herramientas vivas (Diámetro) (Grupo 00)
- G200 Buscar sobre la marcha (Grupo 00)



3.4.3.- Códigos "M"

Los Códigos M son comandos para la máquina que no mueven los ejes. El formato para un código M es una letra "M" seguida de dos números, por ejemplo M03.

Todos los códigos M toman efecto al final de un bloque y solo se permite uno de ellos por línea.

La siguiente lista es un resumen de los códigos M de HASS, en el se incluyen algunos códigos opcionales.

M00 parar programa

M01 parada opcional del programa

M02 fin del programa

M03 / M04 / M05 comandos del husillo

M08 refrigerante encendido/ M09 refrigerante apagado

M10 fijar mandril / M11 liberar mandril

M12 auto inyector de aire encendido (opcional) / M13 auto inyector de aire apagado (opcional)

M14 fijar husillo principal / M15 liberar husillo principal

M17 rotación de la torreta siempre adelante / M18 rotación de la torreta siempre atrás

M19 orientar husillo

M21 cabezal móvil adelante / M22 cabezal móvil atrás

M21-M28 opcional usuario función M

M23 achaflanado de rosca encendido / M24 achaflanado de rosca apagado

M30 fin del programa y retorno al inicio del programa

M31 transportador automático de virutas adelante / M33 detener transportador automático de virutas

M36 colector de piezas arriba (opcional) / M37 colector de piezas abajo (opcional)



M38 variación da la velocidad del husillo encendido / M39 variación da la velocidad del husillo apagado

M41 engranaje bajo/ M42 engranaje alto

M43 liberar torreta / M44 bloquear torreta

M51-M58 establecer códigos M de usuario opcionales

M59 fijar la salida de los relés

M61-M68 limpiar códigos M de usuario opcionales

M69 limpiar relé de salida

M76 deshabilitar pantalla / M77 habilitar pantalla

M78 alarma si se encuentra la señal de omisión / M79 alarma si no se encuentra la señal de omisión

M85 abrir puerta automática (opcional) / M86 cerrar puerta automática (opcional)

M88 sistema de refrigerante a alta presión encendido (opcional) / M89 sistema de refrigerante a alta presión apagado (opcional)

M93 iniciar captura de la posición del eje / M94 detener captura de la posición del eje

M95 modo reposo

M96 saltar si no hay señal

M97 llamar a sub-programa local

M98 llamar al sub-programa

M99 vuelta al subprograma

M109 entrada de usuario interactiva

M119 orientar husillo

M121-M128 código M opcional del usuario

M133 / M134 / M135 comandos de transmisión de herramientas activas

M143 / M144 / M145 comandos del subhusillo (opcional)

M154 enganchar eje-c / M155 desenganchar eje-c (opcional) [42]



3.5.- Maquinado de la CNC

Antes de empezar a confeccionar un programa de maquinado se tiene que conocer bien el maquinado que se va a realizar en el torno y las dimensiones y características del material de partida, así como la cantidad de piezas que hay que componen la serie que hay que maquinar. Con estos conocimientos previos, se establece el sistema de fijación de la pieza en el torno, las condiciones tecnológicas del maquinado en cuanto a velocidad de corte, avance y número de pasadas.

Igualmente se establecen los parámetros geométricos del maquinado, señalando las cotas de llegada y partida de las herramientas, así mismo se selecciona las herramientas que se van a utilizar y las calidades de las mismas.

Velocidad de giro del cabezal. Este dato está en función de las características del material, del grado de maquinado que se desee y del tipo de herramienta que se utilice. El programa permite adaptar cada momento la velocidad de giro a la velocidad más conveniente. Se representa por la letra (S) y puede expresarse como velocidad de corte o revoluciones por minuto del cabezal.

Avance de trabajo. Hay dos tipos de avance para los carros, uno de ellos muy rápido, que es el avance de aproximación o retroceso al punto de partida, y otro que es el avance de trabajo. El programa permite adaptar cada momento el avance que sea más conveniente. Se representa por la letra (F) y puede expresarse en milímetros por revolución o milímetros de avance por minuto.

Otro factor importante a determinar es que todo programa debe indicar el lugar de posición que se ha elegido para referenciar la pieza que se llama "cero pieza". A partir del cero pieza se establece toda la geometría del programa de maquinado. [20]

3.5.1.- Tipos de maquinado

Además del torneado general, se puede realizar una gran cantidad de operaciones de maquinado en un torno. En la figura 3.4 se ilustran las siguientes:

- a) Careado. La herramienta se alimenta radialmente sobre el extremo del trabajo rotatorio para crear una superficie plana.
- b) Torneado cónico. En lugar de que la herramienta avance paralelamente al eje de rotación del trabajo, lo hace en cierto ángulo creando una forma cónica.
- c) Torneado de contornos. En lugar de que la herramienta avance a lo largo de una línea recta paralela al eje de rotación como en torneado, sigue un contorno diferente a la línea recta, creando así una forma contorneada en la parte torneada.

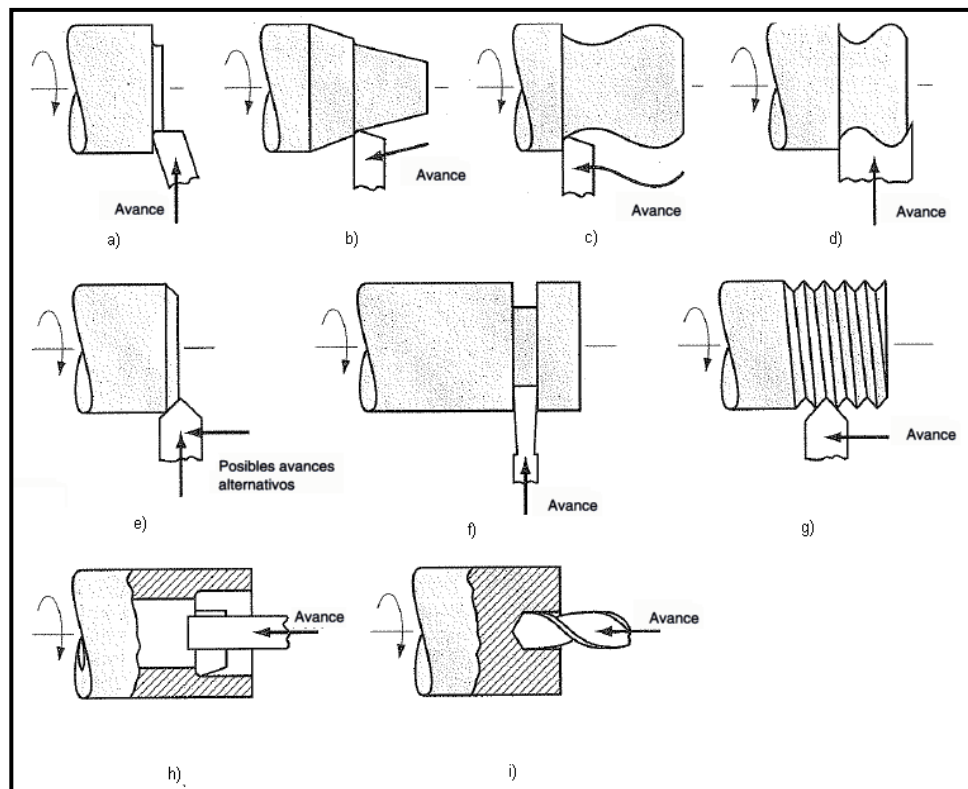


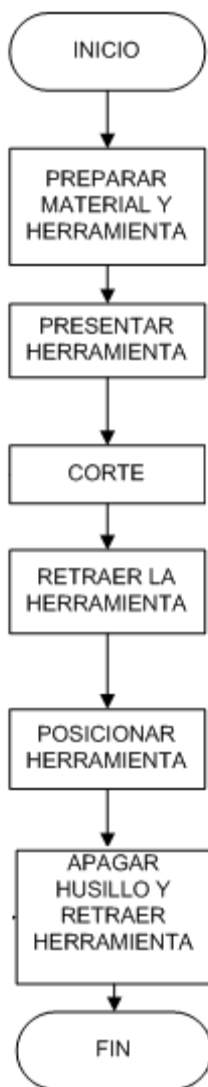
Figura 3. 4 Operaciones de torneado



- d) Torneado de formas. En esta operación llamada algunas veces formado, la herramienta tiene una forma que se imparte al trabajo y se hunde radialmente dentro del trabajo.
- e) Achaflanado. El borde cortante de la herramienta se usa para cortar un ángulo en la esquina del cilindro y forma lo que se llama “chaflán”.
- f) Tronzado. La herramienta avanza radialmente dentro del trabajo en rotación, en algún punto a lo largo de su longitud, para trozar el extremo de la parte. A esta operación se le llama algunas veces partido.
- g) Roscado. La herramienta puntiaguda avanza linealmente a través de la superficie externa de la parte de trabajo en rotación y en dirección paralela al eje de rotación, a una velocidad de avance suficiente para crear cuerdas roscadas en el cilindro.
- h) Perforado. Una herramienta de punta sencilla avanza en la línea paralela al eje de rotación, sobre el diámetro interno de un agujero existente en la parte.
- i) Taladrado. La broca se hace avanzar dentro del trabajo rotatorio a lo largo de su eje. El escariado se hace de forma similar. [25]

3.6.- Creación del algoritmo de control CNC-GM

Con el fin de crear el algoritmo de control en código G-M se realizó un programa base que posteriormente se modificó, introduciendo los datos arrojados de la experimentación, para lo cual fue necesario hacer un diagrama de flujo que se muestra a continuación:



Se trabajó en la realización del algoritmo base para la máquina CNC con el diagrama anterior y a continuación se muestra dicho programa.



Programa con códigos G-M:

%	X0.9	G00 X1.05	X0.67	G00 X1.05
O05568	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
(PIEZA DE 1 in)	G00 X1.05	X0.78	G00 X1.05	X0.55
T10	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G97 S1500 M03	X0.89	G00 X1.05	X0.66	G00 X1.05
G00 Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
X1.	G00 X1.05	X0.77	G00 X1.05	X0.54
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G00 X1.05	X0.88	G00 X1.05	X0.65	G00 X1.05
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
X0.99	G00 X1.05	X0.76	G00 X1.05	X0.53
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G00 X1.05	X0.87	G00 X1.05	X0.64	G00 X1.05
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
X0.98	G00 X1.05	X0.75	G00 X1.05	X0.52
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G00 X1.05	X0.86	G00 X1.05	X0.63	G00 X1.05
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
X0.97	G00 X1.05	X0.74	G00 X1.05	X0.51
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G00 X1.05	X0.85	G00 X1.05	X0.62	G00 X1.05
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1
X0.96	G00 X1.05	X0.73	G00 X1.05	X0.5
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01
G00 X1.05	X0.84	G00 X1.05	X0.61	G00 X1.05
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	G00 Z8.
X0.95	G00 X1.05	X0.72	G00 X1.05	M05
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G28
G00 X1.05	X0.83	G00 X1.05	X0.6	M30
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	%
X0.94	G00 X1.05	X0.71	G00 X1.05	
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	
G00 X1.05	X0.82	G00 X1.05	X0.59	
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	
X0.93	G00 X1.05	X0.7	G00 X1.05	
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	
G00 X1.05	X0.81	G00 X1.05	X0.58	
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	
X0.92	G00 X1.05	X0.69	G00 X1.05	
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	
G00 X1.05	X0.8	G00 X1.05	X0.57	
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	
X0.91	G00 X1.05	X0.68	G00 X1.05	
G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	
G00 X1.05	X0.79	G00 X1.05	X0.56	
Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	Z0.1	G01 Z-0.75 F0.01	



3.6.1.- Subprogramas

Un programa de CNC se realiza en base a necesidades de fabricación de una pieza que puede presentar dificultades en la elaboración del programa, debido a la repetibilidad de su maquinado en piezas de diseño semejante. En algunos controles, uno de los problemas más usuales que se presentan, es el tiempo utilizado en el desarrollo del programa.

Una programación de maquinados repetitivos ocupa bastante memoria del control de la máquina. Se genera un aumento en el tiempo muerto de la máquina al programar secciones de maquinados iguales en productos con maquinados similares.

En base a esto el lenguaje del control cuenta con un método de programación, el cual permite al programador realizar tareas repetitivas para diferentes modelos de piezas, logrando diferenciarse en algunos detalles. A estos métodos se les llama subprogramas.

Un programa se puede descomponer en programa principal y subprograma, estos se programarán en aquellas secciones idénticas de maquinado tales como segmentos de contorno de la pieza iguales, profundidad de barrenos y machuelos iguales utilizadas en piezas similares, etc. [44]

La manera de llamar a un subprograma es por medio del comando M98, a continuación se muestra un ejemplo de la forma en que se hace la programación:

Programa principal:

O05432 (Inicio del programa principal)

...

... (Parte del programa)

...

M98 P234 (Salto al programa O00234 para ejecutar el subprograma)



... (El M99 al final del subprograma regresará/saltará a esta línea)

...

... (Término de la parte del programa)

...

M30 (Fin del programa principal)

Sub-programa:

O00234 (Identifica la separación del sub-programa)

...

... (Parte del sub-programa)

...

M99 (salta a la línea anterior a la llamada del sub-programa en el programa principal)

3.6.2.- Subrutinas

Las subrutinas son normalmente una serie de comandos que se repiten varias veces en un programa. En lugar de repetir los comandos muchas veces en el programa principal, las subrutinas no necesitan estar en un programa separado como los subprogramas.

El programa principal tiene luego un comando que “llama” a la subrutina. Una llamada a subrutina se hace con M97, un código P que debe relacionarse con una N (número de línea).

Las subrutinas pueden incluir un L o contador de repetición. Si se anota L, la llamada a la subrutina se repite ese número de veces antes que el programa principal continúe con el bloque siguiente.

Programa principal:

O04321 (Inicio del programa principal)

...



... (Parte del programa)

...

M97 P123 (Salta a la línea N123, después del M30, ejecuta la subrutina local)

... (El M99 al final del subprograma regresará/saltará a esta línea.)

...

... (Término de una parte del programa)

...

M30 (Final del programa principal)

N123 (identifica el comienzo de la subrutina local llamada por: M97 P123)

...

... (Parte de la subrutina local)

...

M99 (salta a la línea anterior a la llamada del sub-rutina en el programa principal).

3.6.3.- Macros

Las Macros añaden capacidades y flexibilidad al control que no son posibles con códigos G estándar. Algunos usos posibles son, familias de piezas, ciclos preprogramados personalizados, movimientos complejos, y conducir dispositivos opcionales. Las posibilidades son casi infinitas.

Una Macro es una rutina/subprograma que puede ser ejecutada múltiples veces. Una sentencia macro puede asignar un valor a una variable o leer un valor de una variable, evaluar una expresión, reconducir condicional o incondicionalmente a otro punto dentro del programa, o condicionalmente repetir alguna sección de programa.



Llamada a una subrutina macro

El comando para llamar a una subrutina es G65 y tiene la capacidad de pasar argumentos a la subrutina. Esta es la sintaxis:

G65 Pnnnn [Lnnnn] [argumentos];

Los términos en corchetes son opcionales. El comando G65 necesita un Parámetro de dirección P correspondiente al número de un programa presente en la memoria del control. Al usar la dirección L, la llamada a la macro-instrucción se repite tal número de veces.

En el ejemplo que se muestra a continuación, la subrutina 1000 es llamada una vez sin pasarle condiciones a la subrutina. Las llamadas G65 son similares, pero no iguales, a las llamadas M98. Las llamadas G65 pueden ser anidadas hasta 4 veces, lo que significa que, el programa 1 llama al 2, el programa 2 llama al 3, y el programa 3 puede llamar al programa 4.

G65 P1000; (Llamar a la subrutina 1000 como un macro)

M30; (Parar el programa)

O1000 ; (Macro subrutina)

...

M99; (Retorno desde la macro subrutina)

3.7.- Metrología

Metrología es la ciencia de la medición, y se relaciona con seis cantidades fundamentales: longitud, masa, tiempo, corriente eléctrica, temperatura y radiación luminosa. A partir de estas, se derivan la mayoría de las otras cantidades físicas, tales como el área, el volumen, la velocidad, la aceleración, la fuerza, el voltaje eléctrico y la energía térmica. En la metrología de manufactura, nuestro principal interés es la medición de la longitud y sus diversas formas de manifestarse en una



parte o un producto. Estas incluyen longitud, ancho, profundidad, diámetro, rectitud, igualdad de superficie y redondez; incluso la aspereza de una superficie se define en términos de longitud.

Un requerimiento básico en manufactura es que el producto y sus componentes satisfagan las especificaciones establecidas por el ingeniero de diseño. Las especificaciones de diseño incluyen dimensiones, tolerancias, y acabados superficiales de las partes individuales que conforman el producto.

La medición es un proceso en el que una cantidad desconocida es comparada con un estándar conocido, usando un aceptable y consistente sistema de unidades. La medición puede involucrar una simple regla lineal a escala para la longitud de una parte, o puede requerir una medición sofisticada de fuerza contra deflexión durante una prueba de tensión. La medición provee un valor numérico a la cantidad de interés, dentro de los límites de precisión y exactitud.

La inspección es un proceso en el cual las características de una parte o producto, como una dimensión, es examinada para determinar si están conformes a las especificaciones de diseño. [25]

En este proyecto se tomarán en cuenta los conceptos de medición e inspección para la parte experimental, ya que se tiene que llevar a cabo un verificado de las dimensiones en la pieza para en base al resultado sacar conclusiones acerca del experimento.

La manera en que se medirán las piezas será del tipo manual, con ayuda de un micrómetro y un vernier digital.

En la figura 3.5 se puede observar cual es la parte de la pieza que se tomará como medida patrón.

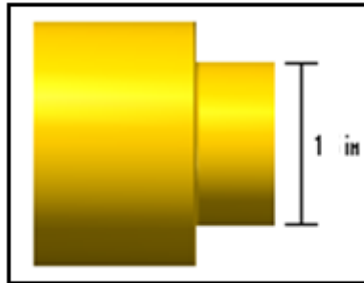


Figura 3. 5 Pieza a medir

3.7.1.- Instrumentos de medición

Los instrumentos de medición son elementos tales como las reglas graduadas o las galgas, o dispositivos indicadores como el vernier, el micrómetro y el reloj comparador.

Los medios auxiliares son necesarios como elementos de fijación y de transmisión, y ayudan a utilizar instrumentos de medición, como por ejemplo: soportes, prismas y topes. [44]

3.7.2.- Exactitud y precisión

La exactitud es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

En otras palabras, es el grado de conformidad de un valor indicado a un valor estándar aceptado o valor ideal, considerando este valor ideal como si fuera el verdadero.

La exactitud define los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un periodo de tiempo determinado.

La precisión es la cualidad de un instrumento por la que tiende a dar lecturas muy próximas unas a otras (realizadas bajo las mismas condiciones experimentales), es decir, es el grado de dispersión de las mismas. Un instrumento puede tener una pobre exactitud, pero una gran precisión.

Por lo tanto, los instrumentos de medida estarán diseñados por los fabricantes para que sean precisos, y como periódicamente se descalibrarán, deben ajustarse para que sean exactos. A señalar que el termino precisión es sinónimo de repetibilidad.[45]

3.7.3.- Micrómetros para diámetros externos

Es un instrumento capaz de valorar dimensiones de milésimas de milímetro, en una sola operación.

El tornillo micrométrico se usa para longitudes menores a las que puede medir el vernier. Este consta de una escala fija y una móvil que se desplaza por rotación.

Este tipo de micrómetro es muy útil para cuando se requieren hacer mediciones de diámetros exteriores como es el caso de esta tesis, es por eso que se adquirió un instrumento de este tipo. A continuación se presentan las características del micrómetro:

- Se pueden medir piezas o herramientas.
- Husillo con punta de carburo.
- Con trinquete que mantiene la fuerza constante.
- El rango de medición es de $.4 - 1$ “.
- Resolución $.00005$ ”- $.001$ mm



Figura 3. 6 Micrómetro digital con tope en V

3.7.4- Especificaciones de los insertos

La información de los insertos fue dada por el proveedor y a continuación se muestra:

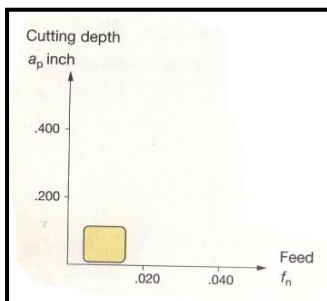


Figura 3. 7 Gráfica con alimentación y profundidad de corte

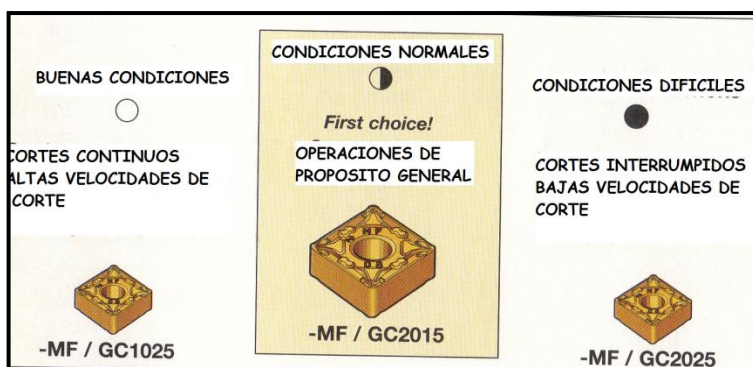


Figura 3. 8 Condiciones para cada tipo de pastilla

Las pastillas que se utilizaron fueron las tres que se muestran abajo y son para las operaciones que se mencionaron en la figura 3.7 y 3.8.

CODIGO PARA ORDENAR							
				GC1025	GC2015	GC2025	
Double sided							a_p inch
	WNMG	331-MF	3/8	☆	★	☆	.016 (.004 – .059)
		332-MF		☆	★	☆	.016 (.004 – .059)
		431-MF	1/2	☆	★	☆	.016 (.004 – .059)
		432-MF		☆	★	☆	.016 (.004 – .059)

Figura 3. 9 Especificaciones de las pastillas

3.7.5- Corridas de prueba

Con el programa anterior se fabricaron piezas a manera de prueba con los siguientes materiales:

- Barra de acero cold roll de 1"
- Pastillas MF 1025, 2015, 2025

La figura 3.10 muestra el proceso de maquinado, así como también las piezas finales.

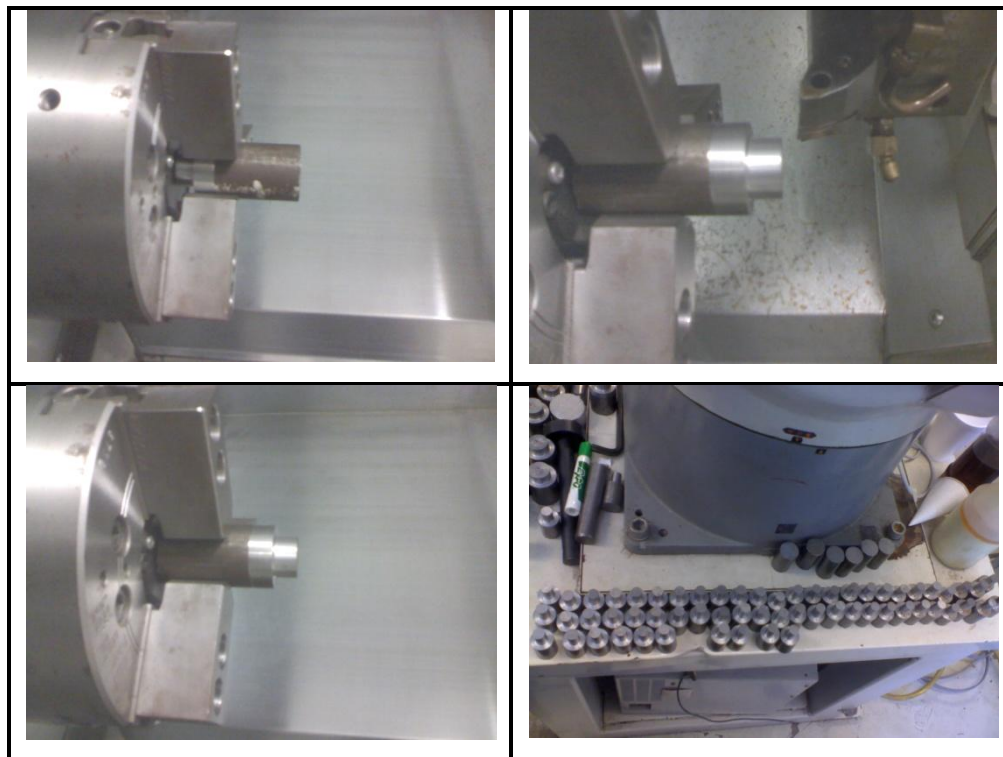


Figura 3. 10 Proceso de maquinado



3.8.- Verificado dimensional

Después de las corridas de prueba que se realizaron, se procedió a medir las piezas, dando como resultado lo siguiente:

Pieza	Medición
1	0,50000
2	0,49990
3	0,49995
4	0,50000
5	0,49995
6	0,50000
7	0,50000
8	0,49990
9	0,49985
10	0,49995
11	0,50000
12	0,49995
13	0,50005
14	0,50010
15	0,50010
16	0,50010
17	0,50015
18	0,50015
19	0,50020
20	0,50015
21	0,50010
22	0,50015
23	0,50030
24	0,50030
25	0,50040
26	0,50054
27	0,50060
28	0,50059
29	0,50065
30	0,5008

Pieza	Medición
31	0,5007
32	0,5008
33	0,50085
34	0,5009
35	0,501
36	0,50105
37	0,50120
38	0,50115
39	0,50125
40	0,50125
41	0,50130
42	0,50135
43	0,50135
44	0,50125
45	0,50135
46	0,50140
47	0,50145
48	0,50145
49	0,50150
50	0,50145
51	0,50155
52	0,50160
53	0,50155
54	0,50160
55	0,50160
56	0,50165
57	0,50180
58	0,50170
59	0,50185
60	0,50180

La obtención de los datos anteriores fue en base a la utilización de un micrómetro digital que se adquirió especialmente para diámetros externos, el cual se describe más adelante.

3.9.- Graficado de la curva primaria

La curva primaria es el resultado de graficar las mediciones contra el número de pieza para así poder conocer el comportamiento presenta y poder hacer posteriormente un ajuste basándonos en dicha tendencia.

En las figuras 3.11, 3.12 y 3.13 hay una serie de puntos que representan la medición del diámetro de la pieza (eje Y) contra el número de esta (eje X), en medio hay una línea de color azul que representa la tendencia y en la parte superior encontramos la formula de dicha aproximación, el recuadro de la derecha nos arroja 3 datos S, R-cuad y R-cuad (ajustado), donde S es la desviación estándar de los datos y los valores de R nos dan un porcentaje, éste tiene que ver con un análisis que realiza el programa utilizado para hacer las gráficas, el cual representa una relación entre las variables que se tienen.

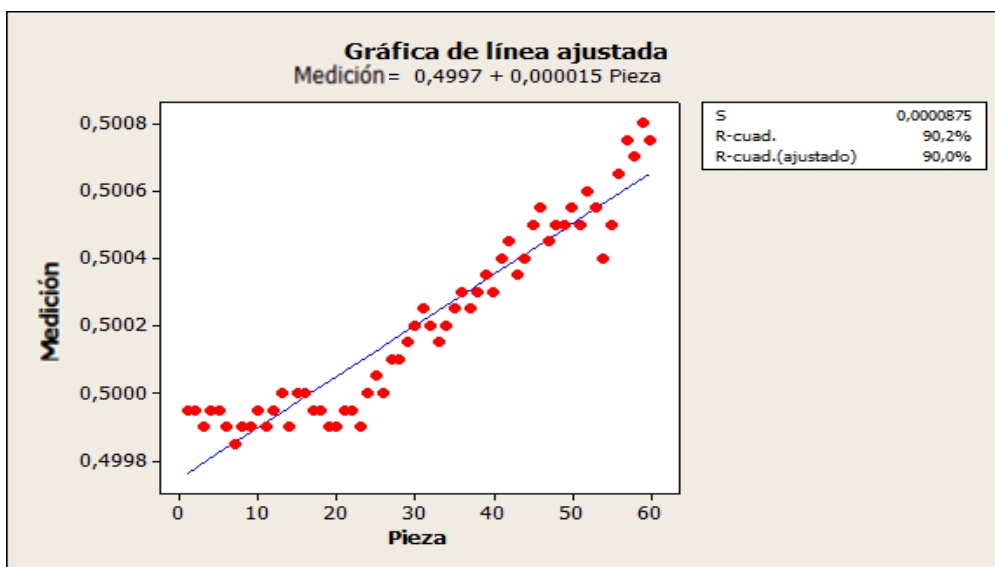


Figura 3. 11 Inserto 1025

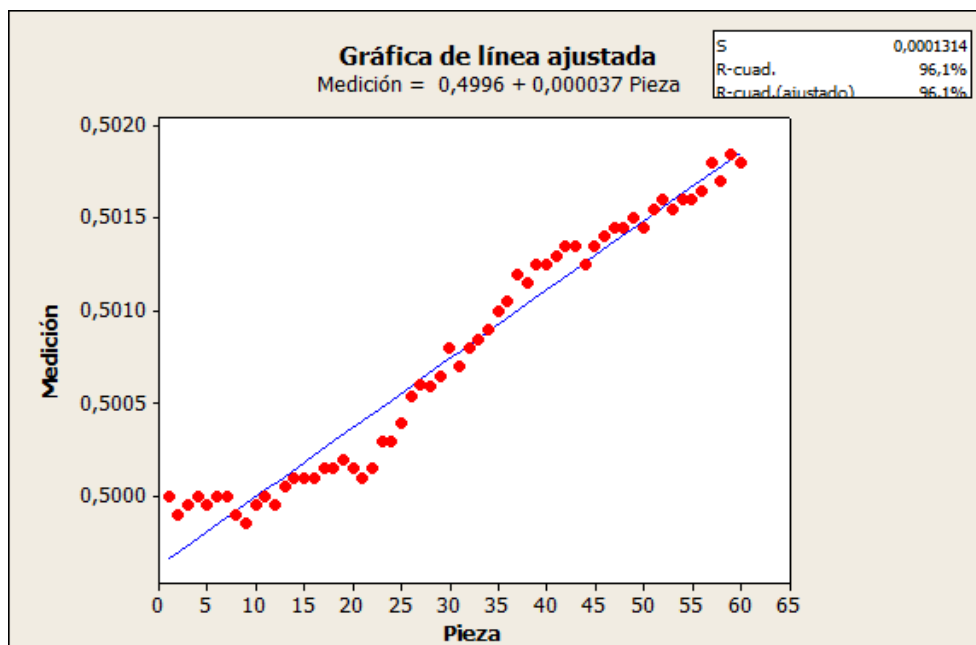


Figura 3. 12 Inserto 2015

Se observa que en la figura 3.11 se cuenta con la menor desviación estándar de las 3 figuras, lo cual indica que hay una diferencia menor entre una medida y otra, es por eso que se tomó ese inserto para hacer el algoritmo.

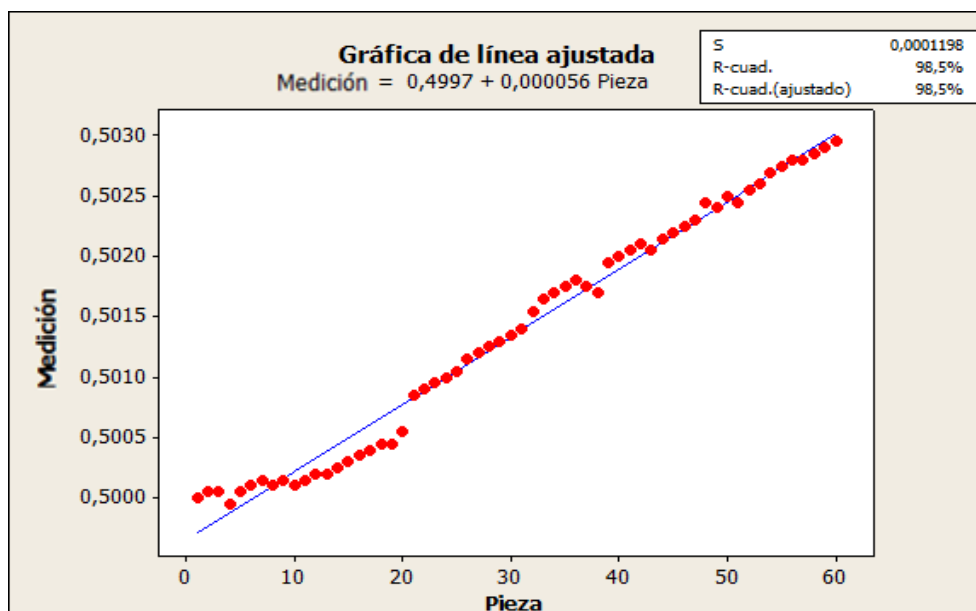


Figura 3. 13 Inserto 2025

En la figura 3.14 se observa el comportamiento de las 3 curvas obtenidas, se superponen una a la otra y se aprecian los límites permisibles.

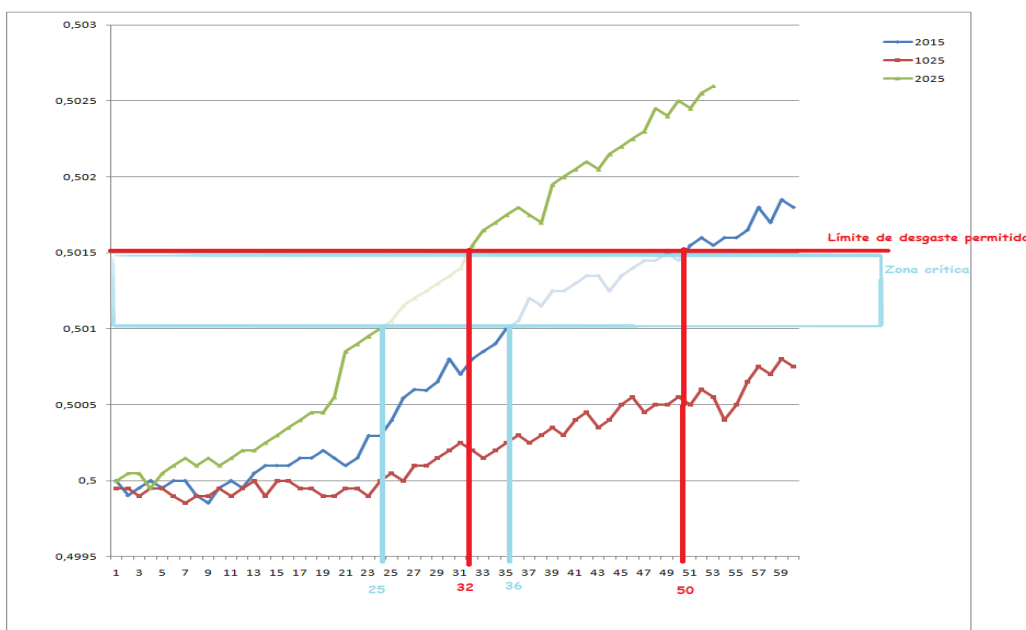


Figura 3. 14 Condensado de gráficas

En la figura 3.14 se denotan con colores las tres figuras anteriores (fig.3.11, 3.12 y 3.13), en la parte superior derecha están indicados con color también a cual inserto pertenece cada una de las líneas, se tiene también una zona crítica que denota el rango en el cual el desgaste en el inserto está por llegar al límite permisible y se observa cómo es que la línea de color guinda (inserto 1025) no llega a ese punto dentro de las piezas maquinadas.

Se puede observar que el comportamiento de las gráficas es ascendente, sin embargo fue necesario hacer un ajuste de tendencia de curva, dicho ajuste se muestra en el siguiente apartado.

Cabe aclarar que el análisis se hizo para los 3 tipos de pastilla pero el ajuste solo se hizo para la pastilla 1025 porque es donde se observó mayor estabilidad en cuanto al desgaste, como se pudo apreciar en la figura anterior.

3.9.1.- Ajuste de curva

Después de realizar el graficado primario de la curva, se hizo un análisis de tendencia para conocer el comportamiento de dichos datos. En la figura 3.15 se pueden apreciar los puntos y su correlación con los valores de diámetros medidos.

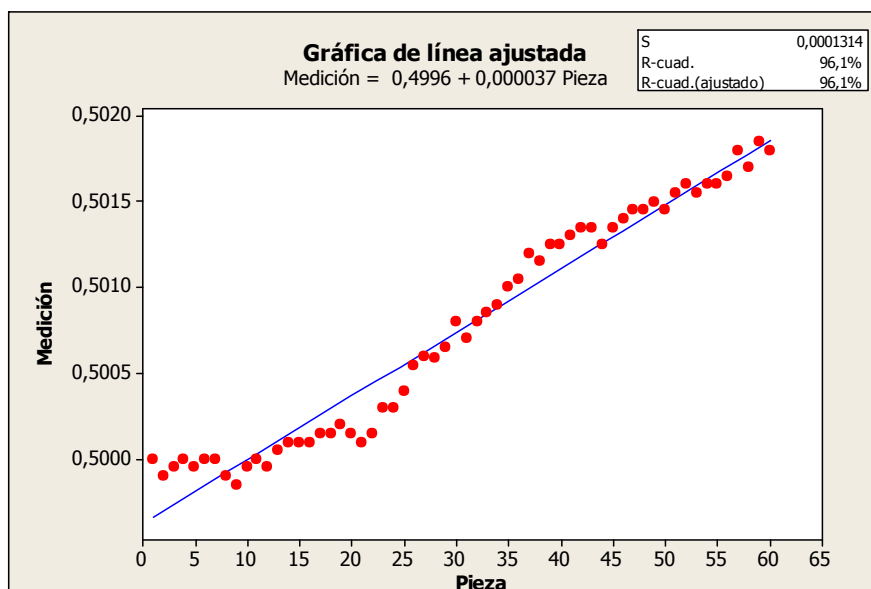


Figura 3. 15 Gráfica con línea ajustada

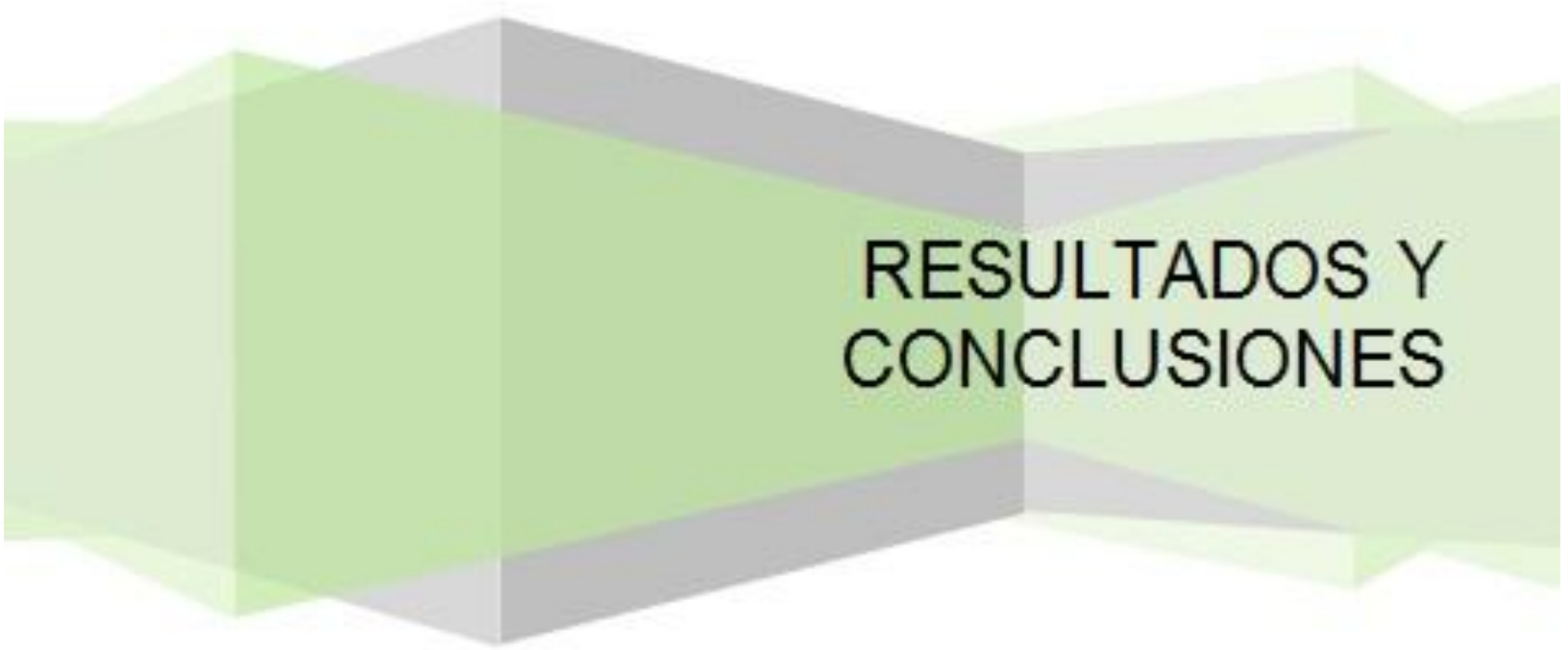
En la fig. 3.15 tenemos igual que en las figuras 3.11, 12 y 13 los datos dispersos de la medición contra el número de pieza, solo que en esta ocasión se hace énfasis especial en la fórmula que se encuentra en la parte superior y en base a ella se realiza el ajuste.

La ecuación resultante es una línea recta con pendiente (Ver ecuaciones 1 y 2) y a través de ella se pueden realizar aproximaciones de desgaste para las piezas subsecuentes. La ecuación muestra una correlación de R-cuad.= 0.916 este valor se considera adecuado para la determinación del ajuste correspondiente.

$$(1) \text{ Desgaste} = \text{Medición}_{(\text{No. Pieza})} - 0.5000$$

$$(2) \text{ Medición}_{(\text{No. Pieza})} = 0.4996 + 0.00037 X_{(\text{No. de Pieza})}$$

CAPÍTULO IV



**RESULTADOS Y
CONCLUSIONES**

4.1.- Resultados

Como producto de la experimentación realizada, se puede apreciar que los códigos G-M son muy útiles en todo tipo de aplicación ya que en este caso se pudo reducir el programa generado al principio, por medio de las subrutinas que maneja el controlador. En la figura 3.16 se muestra el diagrama de flujo que se siguió para la compensación de desgaste y el programa que se realizó con subrutinas y macros:

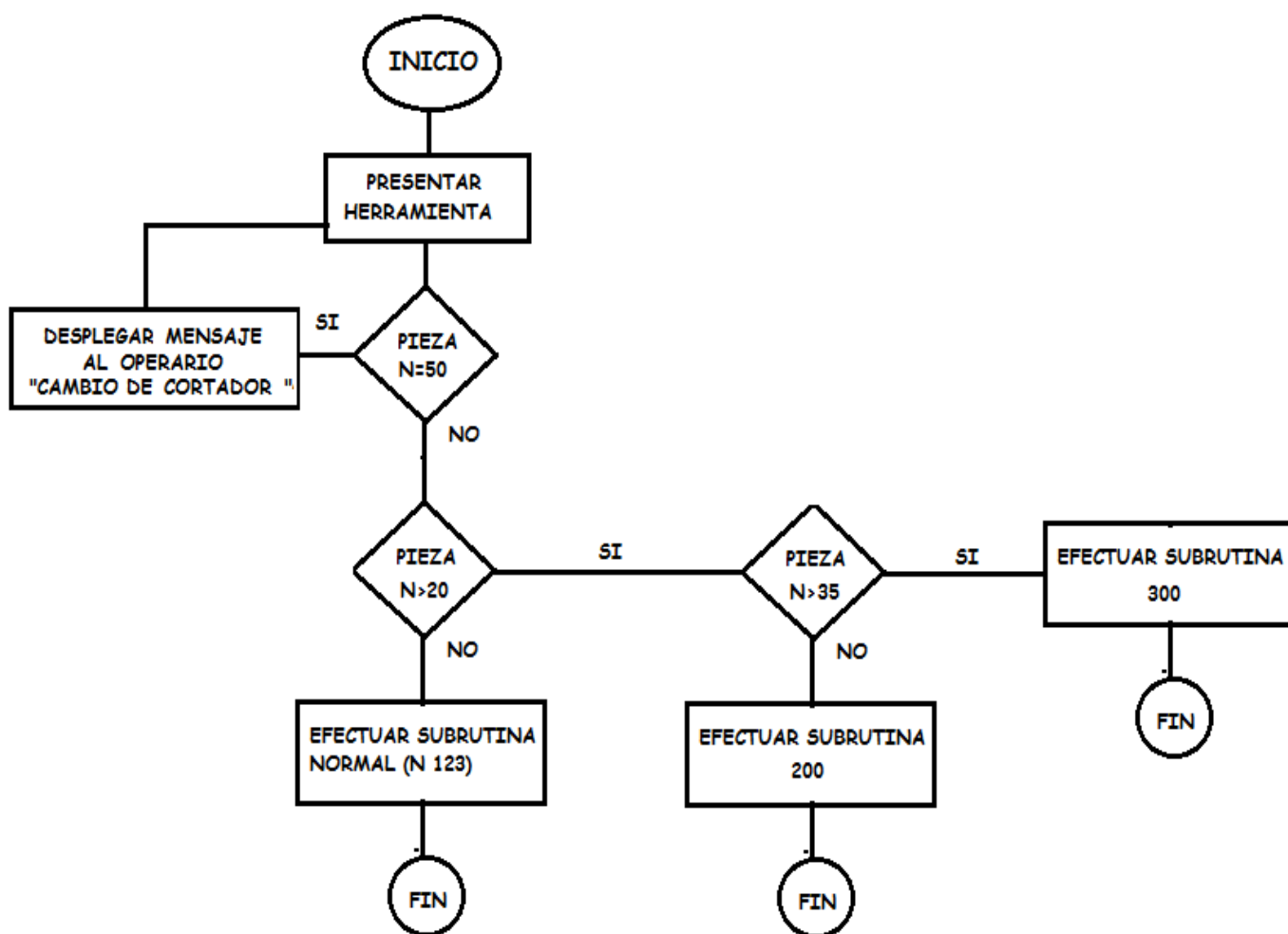


Figura 3. 16 Diagrama de flujo



Programa G-M

```
%  
O05566  
(PIEZA DE 1 in con subrutinas y macros)  
T10  
G97 S1500 M03  
#3000=50 ("CAMBIAR CORTADOR")  
IF[#1 E #2] GOTO N200  
IF[#3 E #4] GOTO N300  
M97 P123 L50  
G00 Z8.  
M05  
G28  
M30  
N123 G00 Z0.1  
G01 Z-0.75 F0.01  
G00 X1.05  
Z0.1  
N200 G00 Z0.1  
G01 Z-0.75 F0.01  
G00 X1.05  
Z0.1  
N300 G00 Z0.1  
G01 Z-0.75 F0.01  
G00 X1.05  
Z0.1  
%
```

Para la parte de la compensación se realizó una modificación en el controlador en el que se escoge el número de pieza que se está utilizando y se agrega el desgaste calculado por medio de las gráficas y basándonos en literatura.

De acuerdo al manual “metal handbook”, el desgaste permitido para el tipo de inserto que se utilizó es de 0.015 in, en este caso la pastilla se desecha o se cambia de filo (ya que cada pastilla tiene 6 puntas), en el caso de la experimentación hecha se puede observar en la figura 3.14 que ese punto se encuentra después de la pieza 49, es por eso que se toma la pieza 50 como el valor en el cual se cambia la herramienta por lo que se incluye un paro opcional M01 con el aviso de cambio de herramienta. En esta misma referencia se establece un rango crítico de operación que se encuentra entre 0.10” a 0.015”. [46]

Para probar el programa, lo que se hizo fue cambiar el número de pieza para comprobar que efectivamente se estuviera efectuando la compensación correspondiente de acuerdo al grupo de piezas, es decir, se manipuló el número de probeta.

Se volvieron a graficar los resultados obtenidos a partir de la modificación en el programa y se obtuvo la gráfica de la figura 3.17, en la cual se observa como las mediciones tienen menor desviación que en las gráficas pasadas, denotando con ello que el programa si redujo el valor de desgaste.

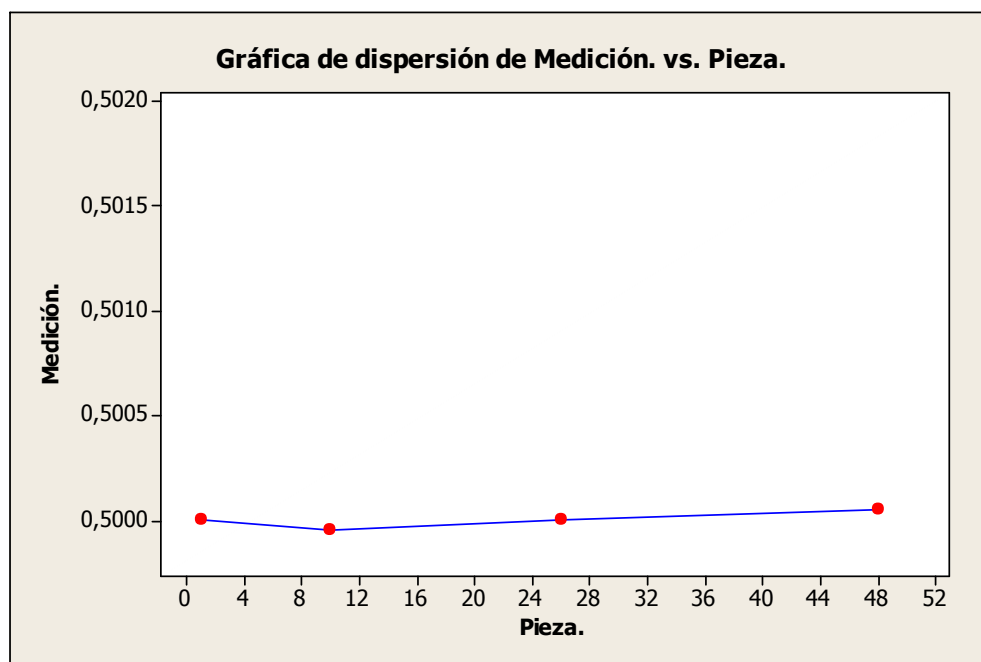


Figura 3. 17 Curva ajustada

Se estimó la desviación estándar de los resultados y se evidenció una disminución, en la corrida sin compensación fue de 0.0001314" y con la compensación disminuyó a 0.0000329". Con esto se puede decir que el sistema es viable dado que la piezas mecanizadas se mantienen en su valor objetivo de .5".



4.2.- Conclusiones

Dado que el objetivo general de la tesis fue el diseño de un sistema que lograra la compensación automática de cortadores y se aplicara en tornos tipo CNC, el objetivo se cumplió puesto que se diseñó y se probó el sistema para la compensación de cortadores.

La programación en cualquier máquina de control es muy importante ya que existen muchas aplicaciones en las cuales usarla, como es el caso de este sistema que a partir de la experimentación realizada se llegó a valores que introducidos a la máquina desempeña una función diferente a la que se plantea originalmente.

Existen diferentes formas para controlar el desgaste, pero la metodología utilizada nos da una solución de forma flexible, ya que tomando parte de esa metodología, se pueden agregar tantos factores como se quieran y llegar al resultado en común que es la compensación de la herramienta y obtener los valores deseados.

Un punto importante para la elaboración del algoritmo fueron las gráficas de los valores que se realizaron ya que en ellas se delimitaron las zonas críticas para el desgaste del cortador y su límite permisible.

Cabe aclarar que la metodología utilizada se puede utilizar en cualquier otra maquinaria, solo se deben ajustar a las operaciones de dicha máquina; si se quisiera utilizar el mismo programa de programación las limitantes serían el lenguaje de comunicación de la CNC, del tipo del inserto y material con que se esté trabajando.



4.3.- Recomendaciones

A continuación se enlistan algunas de las recomendaciones sugeridas a partir de esta tesis:

- Realizar pruebas para diferentes pastillas y materiales de corte para así conocer el desgaste para cada tipo de cortador con relación al material de la pieza a cortar, para así tener un campo más amplio de apreciación.
- En cuanto al maquinado, se recomienda introducir el factor refrigerante para conocer la influencia que ejerce en el desempeño del cortador y su acabado.
- Usar un instrumento de medición más adecuado para llevar a cabo la parte de la toma de medidas, como por ejemplo un medidor con laser o si se tiene la posibilidad de usar una CMM mucho mejor, ya que es un factor importante que influye en datos erróneos causando un mal cálculo de desgaste.
- Se pueden realizar pruebas con el microscopio para evidenciar de una mejor manera el acabado que se presenta entre las diferentes piezas, debido al desgaste que se presenta en la pastilla al momento de maquinar.



Referencias

- [1] H.C. Kazanas, Glenn E. Baker and Thomas Gregor. Procesos básicos de manufactura. McGraw-Hill. Primera edición. México. 1989 pp. 198,199,204, 209.
- [2] Bernard Tron Pantoja. Tesis en mecánica. “Diseño de un dinamómetro para medir fuerzas de corte, para el maquinado de acero inoxidable austenítico 304, utilizando galgas extensométricas, para el torno Hardinge”. Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ingeniería Mecánica. 16 de diciembre de 2004.
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/tron_p_b/capitulo2.pdf
- [3] Rubiano Rey Marco. Herramientas de corte (útil de corte).
<http://www.monografias.com/trabajos36/herramientas-de-corte/herramientas-de-corte.shtml>, consultada el 23 de febrero de 2009.
- [4] Serope Kalpakjian y Steven R. Schmid. Manufactura, ingeniería y tecnología. Pearson Education. Cuarta edición. México. 2002.
- [5] Castellano Almoril Juan Martín. Herramientas para Mecanizado de Alta Velocidad.
<http://www.tecsafer.com/pdf/Herramientas%20para%20Mecanizado%20de%20Alta%20Velocidad.pdf>, consultada 26 de febrero de 2009.
- [6] Manual de Sandvik Coromant – “Guía Técnica del Mecanizado”. 2003.
- [7] Correa Julio Alberto. Apuntes técnicos para todos “Tecnología de las herramientas de corte”. Septiembre 23 de 2007.
http://juliocorrea.files.wordpress.com/2007/09/tecnologia-de-corte_parte-3.pdf, consultada 25 de febrero de 2009.



[8] Ingeniería y sistemas de automática. Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas.

<http://isa.umh.es/asignaturas/tftm/Tema%2012%20Vida%20de%20las%20Herramientas.pdf>, consultada el 27 de septiembre de 2008.

[9] David Rodríguez Salgado. Sistemas de monitorización del desgaste de la herramienta en los procesos de torneado. 2004.

<http://www.interempresas.net/metalmecanica/articulos/Articulo.asp?A=11153>), consultada el 30 de agosto de 2008.

[10] López Carrasco Juan. Tesis en mecánica. “Determinación de los factores que influyen en el desempeño de los insertos de la Serie 4000 de Sandvik en un proceso de torneado en seco para acero inoxidable tipo 304 y acero aleado AISI 4140 con la creación de soluciones que puedan corregir dichos factores de influencia”. Universidad de las Américas Puebla, Departamento de Ingeniería Mecánica. Puebla, México. 10 de mayo de 2004.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/lopez_c_jc/capitulo2.pdf

[11] Hiroomi Fukuyama y Shinichi Isobe. Tool compensation system. 1981.
<http://www.google.com/patents?id=3cwBAAAAEBAJ&dq=tool+compensation+system>, consultada 2 de septiembre de 2008.

[12] G. de Anda-Rodríguez y E. Castillo-Castañeda. “Un método de monitoreo del desgaste de una herramienta de corte basado en un sensor de proximidad de fibra óptica”. Ingeniare - Revista Chilena de Ingeniería. Vol. 14 N° 2, 2006.

[13] P. Bleys, J.-P. Kruth, B. Lauwers, A. Zryd, R. Delpretti and C. Tricarico. Real-time Tool Wear Compensation in Milling EDM. Elsevier. 2002.



[14] Taylor y Francis Ltd. International Journal of Production Research. Tool-wear effect compensation under sequential tolerance control. Volumen 37, Número 3. 15 Febrero 1999.

<http://www.informaworld.com/smpp/content~content=a713844503~db=all>, consultada el 16 de septiembre de 2008.

[15] B.H. Amstead, Phillip F. Ostwald y Myron L. Begeman. Procesos de manufactura Versión SI. CECSA. Décimo séptima edición. México. 2002.

[16] Walter Bartsch. Herramientas, máquinas, trabajo: Con ejercicios y ejemplos. Reverté. México. 1978.

[17] Tipos de virutas en los cortes de materiales. Enero 11 de 2006.
<http://es.shvoong.com/exact-sciences/engineering/104520-tipos-virutas-en-los-cortes/>, consultada el 28 de octubre de 2008.

[18] Jack Hugh. Engineering on a disk. Manufacturing process. 2001.

[19] Ing. Escalona Iván. Apuntes de ingeniería mecánica “Arranque de viruta”.
http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/arranquedeviruta/default2.asp, consultada el 1 de marzo de 2009.

[20] Simón Millán Gómez. Procedimientos de Mecanizado. Editorial Paraninfo. Madrid. 2006.

[21] Steve F. Krar y Albert F. Check. Tecnología de las máquinas herramientas. Alfaomega. Quinta edición. México. 2002.

[22] Página Web:

<http://www.xuletas.es/ficha/cortemetales>. consultada el 19 de marzo de 2009.



[23] Robert Fitzgerald W., Mecánica de materiales, Fondo educativo interamericano, México. 1984.

[24] Alting Leon. Procesos para ingeniería de manufactura. Alfaomega. México. 1996.

[25] Groover Mikell P. Fundamentos de manufactura moderna. Pretince-Hall. Primera edición. México. 1997.

[26] R.L Timings. Tecnología de la fabricación. Tomo II. Alfaomega. México. 2001.

[27] Di Prinzio Anna. Caracterización de diversos carburos cementados de producción nacional. 1994.

http://bibliomet.ing.ucv.ve/cgiwin/be_alex.exe?Palabra=CARBUROS+CEMENTADOS&Nombrebd=Biblioteca_de_Metalurgia_Leopoldo_Finol&Recuperar=50/50, consultada el 15 de marzo de 2009.

[28] E. Paul DeGarmo, J. Temple Black, Ronald A. Kohser. Materiales y procesos de fabricación. Volúmen 2. Reverté. Segunda edición. México. 1988.

[29] A. Leyenseter y G. Wurtember. Tecnología para oficios metalúrgicos. Reverté. Primera edición. España. 1990.

[30] Julián Rodríguez Montes, Lucas Castro Martínez y Juan Carlos del Real Romero. Procesos industriales para materiales metálicos. Visión net. Segunda edición. 2006.

[31] La fresadora. Instituto politécnico de León Nicaragua. Octubre de 2008. <http://www.ipls-lasalle.org/foroipls/?p=576> , consultada el 4 de noviembre de 2008.

[32] U. Scharer, J. A. Rico, J. Cruz, Ingeniería de Manufactura. Compañía Editorial Continental. Primera edición.



[33] Ma. Ángeles Martín Hernández, Enrique Berbós Almera, Tomás Herránz Cortés. Manual “Mecánica industrial”. Cultural. Edición MMV. España. 2005.

[34] Distribuidor de tornos “tornos CNC”. <http://www.tornoscncmexico.com/>, consultada el 15 de octubre de 2008.

[35] Andrés Monjo. “Procesos avanzados de maquinado”. <http://ib.cnea.gov.ar/~mater2/MATERIALESII/ProcAvan.pdf>, consultada el 27 de octubre de 2008.

[36] Introducción a la electroerosión. Tecnun. Universidad de Navarra. <http://www.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Electroerosion.pdf>, consultada el 30 de octubre de 2008.

[37] Vanessa Pérez, Mariavictoria Riquelme. Metales, procesos de corte. Universidad de Chile. https://www.u-cursos.cl/fau/2008/0/DIT-204/1/material_alumnos/objeto/4033, consultada el 13 de noviembre de 2008.

[38] La tecnología por corte de agua. Quiminet. Febrero de 2006. <http://www.quiminet.com/pr0/Corte%2Bpor%2Bagua.htm>, consultada el 28 de octubre de 2008.

[39] John Jairo Coronado Marín. Economía en el maquinado para la industria metalmecánica. Estudios gerenciales (Universidad ICESI). 2005.

[40] Erik Oberg, Franklin D. Jones, Holbrook L. Horton y Henry H. Ryffel. Machinery’s handbook. Industrial Press Inc. New York 2004. 27 Edición.



[41] Douglas Montgomery. Diseño y análisis de experimentos. Grupo editorial Iberoamérica. México 1991. Primera edición.

[42] HASS automation inc. Manual del operador del torno. 2005.

[43] M.C. Nuño Moreno Víctor. Apuntes de manufactura integrada por computadora. 2000.

[44] H. Appol, K. Feiler, A. Reinhard, P. Schmidt. Tecnología de los metales. Editorial Reverté. España. 2005.

[45] Creus Sole, Antonio. Instrumentacion industrial. Editorial Marcombo. Séptima edición. España. 2005.

[46] Christopher McCauley Machinery's Handbook 27th Edition Industrial Press, Inc. ISBN-13: 9780831127374, 2004