CAPÍTULO 4

OPERACIONES DE MAQUINADO Y MÁQUINAS-HERRAMIENTA.

4.1 Fresado.

Es una de las máquinas-herramienta más versátiles y útiles en los sistemas de manufactura. Las fresas son máquinas de gran precisión, se utilizan para la realización de desbastes, afinados y superacabados.

De entre sus características destaca que su movimiento principal lo tiene la herramienta y que la mesa de trabajo proporciona el avance y algunas veces la profundidad de los cortes.

Los trabajos que se pueden realizar con una fresadora son diversos; por ejemplo se pueden fabricar los dientes de un engrane, un cordón en una placa, un cuñero o formas determinadas sobre una superficie.

En la tabla 8 se puede observar la clasificación de las máquinas fresadoras

Máquina	Característica	Limitaciones
Fresadora horizontal	La fresa se coloca sobre un eje horizontal, que se ubica en el husillo principal. Realiza trabajos de desbaste o acabado en línea recta, generando listones o escalones. La herramienta trabaja con su periferia como se muestra en la figura 3.17 a).	La limitación de esta máquina es la profundidad a la que puede trabajar, ya que ésta dependerá de la distancia de la periferia de la herramienta, al eje de la máquina.
Fresadora vertical	La fresa se coloca en un husillo vertical, éste al girar produce el movimiento principal. La herramienta trabaja con su periferia y con la parte frontal como se muestra en la figura 3.17 b).	La limitación de esta máquina es la fuerza perpendicular a la que se puede someter la fresa por la mesa de trabajo, para lograr el avance.
Fresadora Universal	Es la combinación de una fresa horizontal y una vertical. Tiene un brazo que puede utilizarse para ubicar fresas en un eje horizontal y un cabezal que permite las fresas verticales.	Su limitación es el costo y el tamaño de las piezas que se pueden trabajar.

Tabla 8 Clasificación, características y limitaciones de las máquinas fresadoras

Como se menciona en el cuadro anterior, los cortadores de las fresas pueden trabajar con su superficie periférica o con su superficie frontal. En el primer caso el trabajo puede ser en paralelo o en contra dirección. Con el trabajo en contra dirección la pieza tiende a levantarse, por lo que hay que fijar fuertemente a la misma con una prensa. Cuando el trabajo es en paralelo la fresa golpea cada vez que los dientes de la herramienta se entierran en la pieza.

Durante cada revolución los dientes de las fresas sólo trabajan una parte de la revolución, el resto del tiempo giran en vacío, lo que baja la temperatura de la herramienta. Ver figura 3.18, 3.19 y 3.24.

Producción de las máquinas fresadoras.

Como en todas las máquinas-herramienta, en las fresas es necesario calcular el número de revoluciones a las que deben operar.

$$n = (v \times 1000) / (\pi \times d) \qquad (19)$$

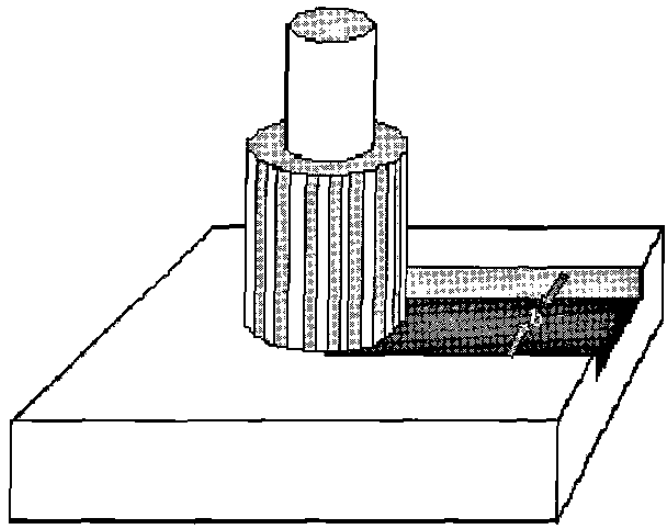
donde: n = revoluciones por minuto
v = velocidad de corte (m/min)
d = diámetro de la fresa (mm/min)

La velocidad (v) se obtiene de la tabla 9:

Tabla 9 Tabla para obtener la velocidad optima de maquinado para cada material

Material de trabajo		Fresa cilíndrica b=100 mm		Fresa frontal b=70 mm		Fresa de disco b= 20 mm		Fresa de vástago b=25 mm		Platos de cuchillas b=180 mm		Sierras b= 2.5 mm
Acabado Profundidad		desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste	afinado	desbaste
		a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=5	a=0.5	a=10
Acero sin alear hasta 65 kg/mm2	Vc	17	22	17	22	18	22	17	22	20	30	45
	S'	100	60	100	70	100	40	50	120	20	50	50
Acero aleado kg/mm2	Vc	14	18	14	18	14	18	15	19	16	23	35
	S'	80	50	90	55	80	30	40	100	65	40	40
Acero aleado hasta 100 kg/mm2	Vc	10	14	10	14	12	14	13	17	14	18	25
	S'	50	36	55	42	50	25	20	65	36	30	30
Fundición gris	Vc	12	18	12	18	14	18	15	19	16	24	35
	S'	120	60	140	70	120	40	60	120	100	90	50
Latón	Vc	35	35	36	55	36	55	35	55	50	60	350
	S'	70	50	190	150	150	75	80	120	200	120	200
Materiales ligeros	Vc	200	250	200	250	200	250	160	180	250	300	320
	S'	200	100	250	110	200	100	90	120	250	90	180

a = 5 mm equivale a desbastado
a = 0.5 mm equivale a afinado
b = ancho de la fresa en mm (Ver Figura # 4.1)
Vc = Velocidad de corte en m/min
S'= Velocidad de avance en mm/min



b = ancho de la fresa

Figura 4.1 Fresado vertical indicando el ancho de la herramienta

Para calcular la capacidad de producción de una máquina fresadora, es necesario conocer la cantidad máxima de viruta que esta puede desprender, esto es el producto de una constante para las diferentes máquinas fresadoras que se denomina como "cantidad de viruta admisible" por la potencia de la máquina. A continuación se presentan las fórmulas para calcular la cantidad máxima de viruta que puede desprender una fresa y la velocidad de avance.

Cantidad máxima de viruta posible de una máquina fresadora

$$V=V' \times N \qquad (20)$$

En donde:

V= cantidad máxima de viruta posible en cm^3/min.

V'= cantidad admisible en cm^3/kwmin (tabla de viruta admisible)

N= potencia de la máquina en kw. (1 hp = 0.746 kw)

En tabla 10 se muestra la viruta admisible en una fresadora (cm^3/kw min)

Tabla 10 Viruta admisible en una fresadora

Tipo de fresa	Acero 35-60 kg/mm^2	Acero 60-80 kg/mm^2	Acero >80 kg/mm^2	Fundición gris	Latón y bronce rojo	Metales ligeros
Fresa cilíndrica	12	10	8	22	30	60
Fresa frontal	15	12	10	28	40	75

Conocer la cantidad máxima de viruta que en una fresa se puede desprender, nos permitirá calcular la velocidad de avance de la misma despejando s' de la siguiente fórmula.

$$V = (a \times b \times s')/1000 \qquad (21)$$

En donde:

a = profundidad del fresado

b = ancho del fresado

s' = velocidad de avance de la fresa

V = cantidad máxima posible de viruta

Despejando la velocidad de avance s', tenemos:

$$s' = (V \times 1000) / a \times b \qquad (22)$$

Con la velocidad de avance se puede calcular el tiempo principal utilizado para realizar un trabajo con una fresa, esto se puede observar a continuación.

$$Tp = L / s' \qquad (23)$$

En donde:

L = Longitud total de recorrido sobre la pieza

s' = Velocidad de avance de la fresa

$$L = l + la + lu \tag{24}$$

Donde:
L = Longitud total de recorrido sobre la pieza
l = Longitud efectiva sobra la pieza
la = Distancia de posicionamiento antes de la pieza (longitud anterior)
lu = Distancia de posicionamiento después de la pieza (longitud ulterior)

Se debe recordar que el tiempo principal es el 60% del tiempo total de fabricación.

El fresado es una operación de maquinado en la cual se hace pasar una pieza de trabajo frente de una herramienta cilíndrica rotatoria con múltiples bordes o filos cortantes (en algunos casos raros se usa una herramienta con un solo filo cortante llamado cortador volate).[4] El eje de rotación de la herramienta cortante es perpendicular a la dirección del avance. La orientación entre el eje de la herramienta y la dirección del avance es la característica que distingue al fresado del taladrado. En el taladrado, la herramienta de corte avanza en dirección paralela a su eje de rotación. La herramienta de corte en el fresado se llama fresa o cortador para fresadora y los bordes cortantes se llaman dientes. La máquina herramienta que ejecuta tradicionalmente esta operación es una fresadora.

La forma geométrica creada por el fresado es una superficie plana. Se pueden crear otras formas mediante la trayectoria de la herramienta de corte o la forma de dicha herramienta. Debido a la variedad de formas posibles y sus altas velocidades de producción el fresado es una de las operaciones de maquinado mas versátiles y ampliamente usadas.

El fresado es una operación de corte interrumpido; los dientes de la fresa entran y salen de la pieza de trabajo durante cada revolución. Esto interrumpe la acción de corte y sujeta los dientes a un ciclo de fuerzas de impacto y choque térmico en cada rotación. El material de la herramienta y la geometría del cortador deben diseñarse para soportar estas condiciones.

4.1.1 Tipos de operaciones de fresado.

Hay dos tipos básicos de operaciones de fresado como se muestran en la figura 4.2

a) Fresado periférico o plano y
b) Fresado de caras o frontal

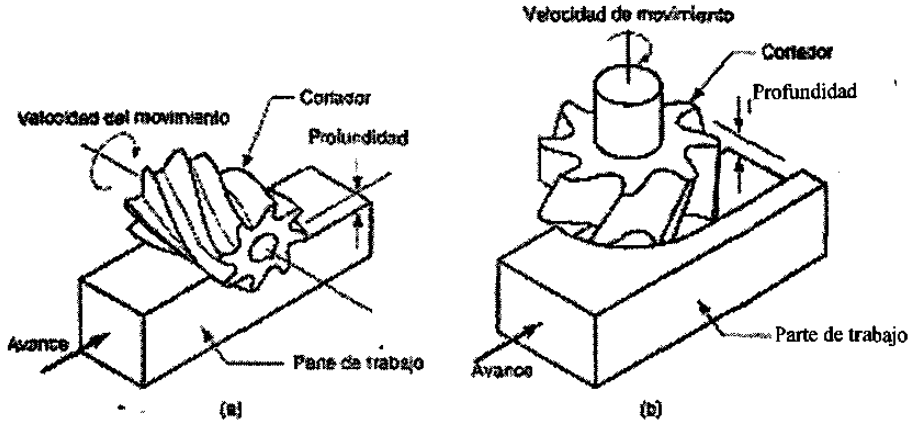


Figura 4.2 Dos tipos básicos de la operación de fresado a) fresado periférico o plano y b) fresado frontal

Fresado periférico. En el fresado periférico, también llamado fresado plano, el eje de la herramienta es paralelo a la superficie que se está maquinando y la operación se realiza por los bordes de corte en la periferia exterior del cortador. En la figura 4.3 se muestran varios tipos de fresado periférico: (a) fresado de placa, la forma básica de fresado periférico en la cual el ancho de la fresa se extiende más allá de la pieza de trabajo en ambos lados; (b) ranurado, también llamado fresado de ranuras, en el cual el ancho de la fresa es menor que el ancho de la pieza de trabajo, creando una ranura en el trabajo (cuando la fresa es muy delgada se puede usar esta operación para tallar ranuras angostas o para cortar una parte de trabajo en dos, llamado fresado aserrado); (c) fresado lateral, en el cual la fresa maquina el lado de una pieza de trabajo; y (d) fresado paralelo simultáneo, el cual es el mismo que en el fresado natural, excepto que el corte tiene lugar en ambos lados del trabajo.

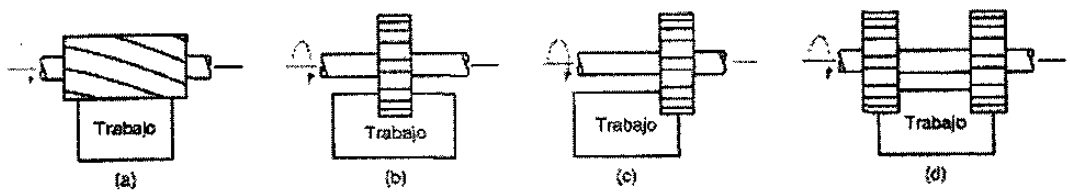


Figura 4.3 Fresado periférico: a) Fresado de placa, b) ranurado, c) fresado lateral y d) fresado paralelo simultáneo

En el fresado periférico existen dos direcciones opuestas de rotación que puede tener la fresa con respecto al trabajo. Estas direcciones distinguen dos formas de fresado, fresado ascendente y fresado descendente que se ilustran en la figura 4.4. En el fresado ascendente, también llamado fresado convencional, la dirección del movimiento de los dientes de la fresa es opuesto a la dirección de avance cuando cortan el trabajo. Es decir, cortan "contra el avance". En el fresado descendente, también llamado fresado tipo escalamiento, la dirección del movimiento de la fresa es la misma que la dirección de avance cuando los dientes cortan el trabajo. Es un fresado "con el avance".

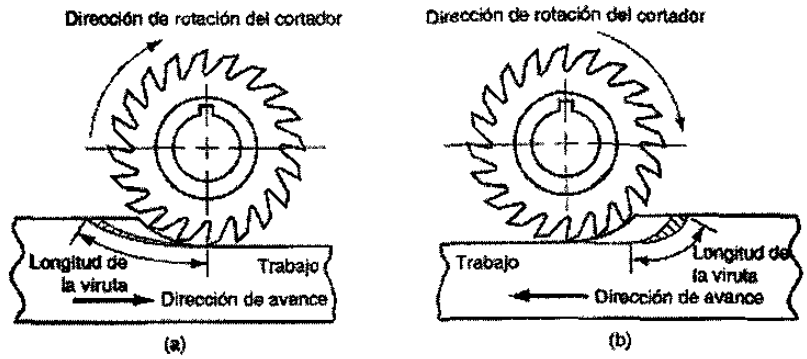


Figura 4.4 Dos formas de fresado con una fresa de 20 dientes: a) fresado ascendente y b) fresado descendente

La geometría relativa de estas dos formas de fresado tiene sus diferencias en las acciones de corte. En el fresado ascendente, la viruta formada por cada diente del cortador comienza muy delgada y aumenta su espesor durante el paso del diente. En el fresado descendente, cada viruta empieza gruesa y se reduce a través del corte. La longitud de una viruta en el fresado descendente es menor que en el fresado ascendente (en nuestra figura la diferencia está exagerada para mayor comprensión). Esto significa una reducción en el tiempo de trabajo por volumen de material cortado, lo cual tiende a incrementar la vida de la herramienta en el fresado descendente.

La dirección de las fuerzas cortantes difieren en el fresado ascendente y descendente. La dirección de la fuerza de corte es tangencial a la periferia de la fresa para los dientes que están enganchados en el trabajo. En el fresado ascendente hay una tendencia a levantar la parte de trabajo al salir los dientes del cortador del material. En el fresado descendente la dirección de la fuerza de corte es hacia abajo, y por esa causa el trabajo se mantiene contra la mesa de la máquina de fresado.

Fresado en las caras o fresado frontal. En el fresado frontal, el eje de la fresa es perpendicular a la superficie de trabajo y el maquinado se ejecuta por los bordes o filos cortantes del extremo y la periferia de la fresa. Cuando el diámetro de la fresa es más grande que el ancho de la parte de trabajo, de tal manera que la fresa sobrepasa al trabajo en ambos lados, se denomina fresado frontal convencional, el cual se ilustra en la figura 4.5(a). De igual manera que en el fresado periférico, también en el fresado frontal existen diversas formas, varias de ellas se ilustran en la figura 4.5(b): fresado parcial de caras o parcial frontal, en el cual la fresa sobrepasa al trabajo solamente en un lado; (c) fresado terminal, en el cual el diámetro de la fresa es menor que el ancho del trabajo, de manera que se corta una ranura dentro de la parte; (d) el fresado de perfiles es una forma de fresado terminal en el cual se corta una parte plana de la periferia; (e) fresado de cavidades, otra forma de fresado terminal usada para fresar cavidades poco profundas en

partes planas; (f) fresado de contorno superficial, en el cual una fresa con punto de bola (en lugar de una fresa cuadrada) se hace avanzar hacia delante y hacia atrás y hacia un lado y otro del trabajo, a lo largo de una trayectoria curvilínea a pequeños intervalos para crear una superficie tridimensional. Se requiere el mismo control básico para maquinar los contornos de los moldes y dados en cuyo caso esta operación se llama tallado o contorneado de dados.

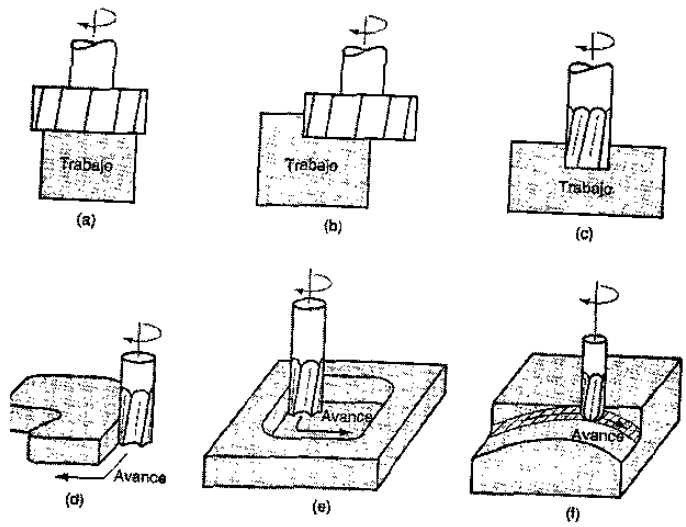


Figura 4.5 Operaciones de fresado

La clasificación de los cortadores para fresadores o fresas como se les conoce comúnmente, está muy asociada con las operaciones de fresado que se acaba de describir. Los tipos de fresas incluyen los siguientes:

- Cortadores cilíndricos o fresas planas. Estos se usan en el fresado periférico de planchas. Como se indica en la Figura.4.2(a), son fresas cilíndricas con varias filas de dientes. Los bordes cortantes se orientan por lo general en un ángulo de hélice (como en la figura 4.2a) para reducir el impacto de la entrada en el trabajo; estas fresas se llaman cortadores helicoidales. Los elementos de la geometría de una fresa plana se muestra en la Figura 4.6.

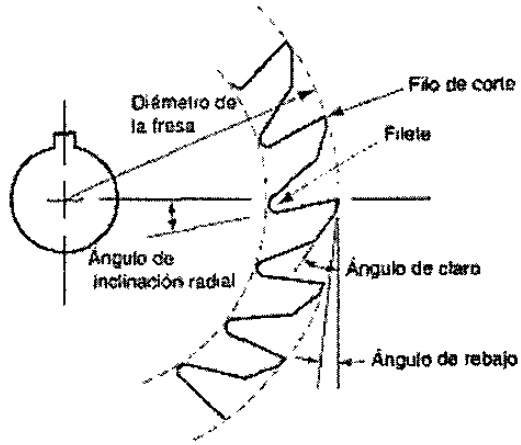


Figura 4.6 Elementos de la geometría de una fresa plana de 18 dientes

- Cortadores formadores o fresas formadoras. En estos cortadores periféricos, los bordes cortantes tienen un perfil especial que imparten el trabajo. Una aplicación importante está en la fabricación de engranes, en el cual la fresa formadora tiene una forma que corta las ranuras entre los dientes adyacentes de los engranes, formando de esta manera la geometría del diente del engrane.

- Cortadores frontales o fresas frontales. Estos se diseñan con dientes que cortan tanto lateralmente como en la periferia de la fresa. Las fresas frontales se pueden hacer de acero de alta velocidad como se muestra en la Figura 4.2(b), o se pueden diseñar para usar insertos de carburo cementado. La Figura 4.7 muestra una fresa frontal de cuatro dientes que usa insertos.

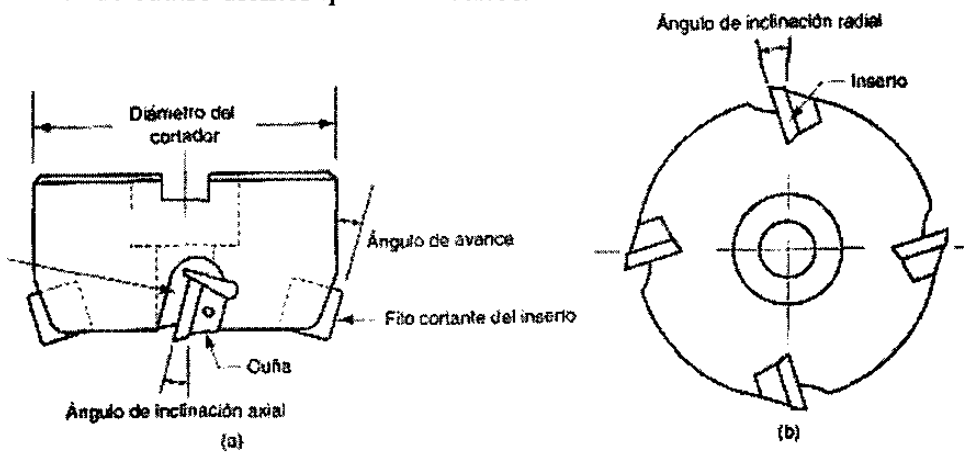


Figura 4.7 Elementos de la geometría de una fresa frontal de 4 dientes a) vista lateral y b) vista inferior

- Cortadores para acabados o fresa terminal. Como se muestra en la Figura 4.8, una fresa terminal se parece a una broca, pero si se observa con más atención está diseñada para un corte primario con los dientes periféricos más que con su extremo ,una broca corta solamente en su extremo al penetrar en el trabajo. Las fresas terminales se diseñan con extremos cuadrados, extremos con radio y extremos de bola. Los extremos pueden usarse para fresado frontal, fresado de perfiles y cavidades, cortar ranuras, grabar, fresar contornos de superficie y tallar dados.

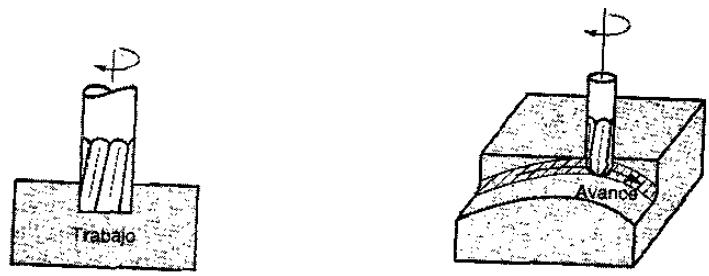


Figura 4.8 Cortador para acabado o fresa terminal

CONDICIONES DE CORTE EN FRESADO

La velocidad de corte se determina con el diámetro exterior de la fresa. Esta puede convertir a la velocidad de rotación del husillo usando una fórmula que por ahora debe ser familiar:

$$N = \frac{\upsilon}{\pi D} \tag{25}$$

El avance f en fresado se determina por lo general como el avance por diente cortante, llamado carga de viruta, y representa el tamaño de la viruta formada por cada filo de corte. Esto se puede convertir a velocidad de avance tomando en cuenta la velocidad del husillo y el número de dientes en la fresa como sigue:

$$f_r = N n_t f \tag{26}$$

donde f_r = velocidad de avance en mm/min; N = velocidad del husillo en rev/min; n_t = número de dientes en la fresa; y f = carga de viruta en mm/diente.

La remoción de material en el fresado se determina usando el producto del área de la sección transversal del corte por la velocidad de avance. Por consiguiente, si una operación de fresado de una plancha corta una pieza de trabajo con ancho w a una profundidad d, la velocidad de remoción de material es:

$$MRR = w\, d f_r \tag{27}$$

Esto ignora la entrada inicial de la fresa antes de su enganche completo. La ecuación (26) se puede aplicar al fresado de acabado, fresado lateral, fresado frontal y otras

operaciones de fresado, haciendo los ajustes apropiados en el cálculo del área de la sección recta del corte.

El tiempo requerido para fresar una pieza de trabajo de longitud L debe tomar en cuenta la distancia de aproximación requerida para enganchar completamente la fresa. Se considera primero el caso del fresado de una plancha (Figura 4.9). Para determinar el tiempo de ejecución de una operación de fresado de la plancha, la distancia de aproximación A para alcanzar la velocidad de corte completo se determina mediante:

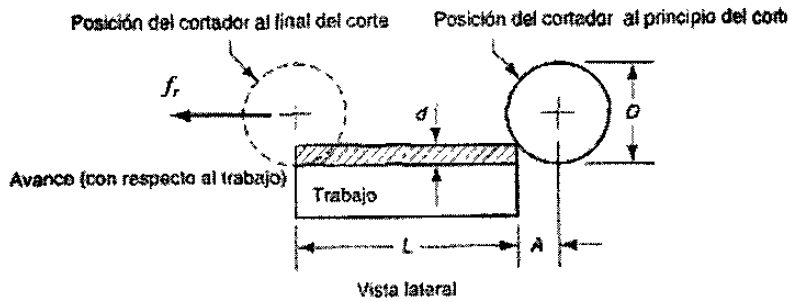


Figura 4.9 Fresado de una plancha, para determinar el tiempo de ejecución de la operación, distancia de aproximación para alcanzar la velocidad de corte completo

$$A = \sqrt{d\,(D - d)} \tag{28}$$

Donde:

d = profundidad de corte, (mm)
D = diámetro de la fresa, (mm)

El tiempo para fresar la pieza de trabajo T_m es por tanto:

$$T_m = \frac{L + A}{f_r} \tag{29}$$

Para el fresado frontal es costumbre dejar para la aproximación la distancia A más una distancia O, que representa la profundidad de desbaste inicial. Hay dos casos posibles, como se muestra en la Figura 4.10 y 4.11. En ambos casos $A = O$. El primer caso es cuando la fresa se centra sobre la pieza de trabajo rectangular. En la Figura 4.10 es evidente que A y O son iguales a la mitad del diámetro del cortador. Esto es:

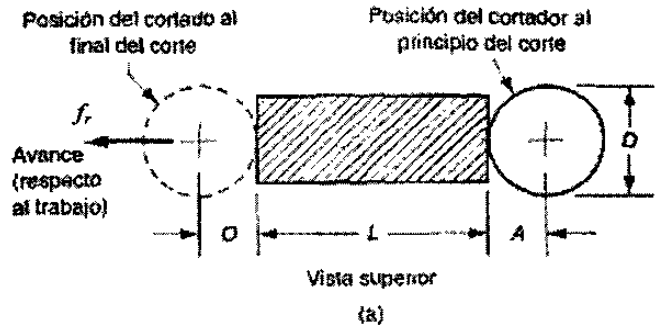


Figura 4.10 Fresa centrada sobre la pieza de trabajo

$$A = O = \frac{D}{2} \tag{30}$$

Donde:

D = diámetro de la fresa, (mm).

El segundo caso es cuando la fresa sobresale a uno de los lados del trabajo, como se muestra en la Figura 4.11. En este caso, las distancias de aproximación y la distancia adicional están dadas por:

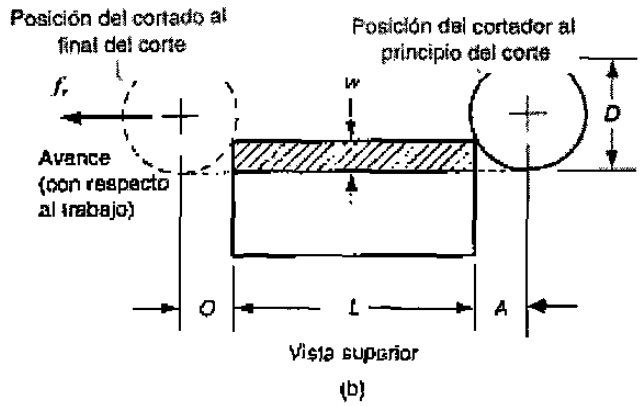


Figura 4.11 Fresadora sobresaliente a uno de los lados de la pieza de trabajo

$$A = O = \sqrt{w(D - w)} \tag{31}$$

Donde:

w = ancho del corte, (mm).

Por tanto, el tiempo de maquinado en cada caso está dado por:

$$T_m = \frac{L + 2A}{f_r} \tag{32}$$

4.2 Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas.

4.2.1 Control numérico.

El control numérico es un ejemplo de automatización programable. Se diseñó para adaptar las variaciones en la configuración de los productos. Su principal aplicación se centra en volúmenes de producción bajos y medios. Uno de los ejemplos más importantes de automatización programable es el control numérico en la fabricación de partes metálicas. El control numérico (CN) es una forma de automatización programable en la cual el equipo de procesado se controla a través de números, letras y otros símbolos. Estos números, letras y símbolos están codificados en un formato apropiado para definir un programa de instrucciones para desarrollar una tarea concreta. Cuando la tarea en cuestión cambia, se cambia el programa de instrucciones. La capacidad de cambiar el programa hace que el CN sea apropiado para volúmenes de producción bajos o medios, dado que es más fácil escribir nuevos programas que realizar cambios en los equipos de procesado. (Ver figura 4.12). El primer desarrollo en el área del control numérico se le atribuye a John Parsons. [17] El concepto de control numérico implicaba el uso de datos en un sistema de referencia para definir las superficies de contorno de las hélices de un helicóptero.

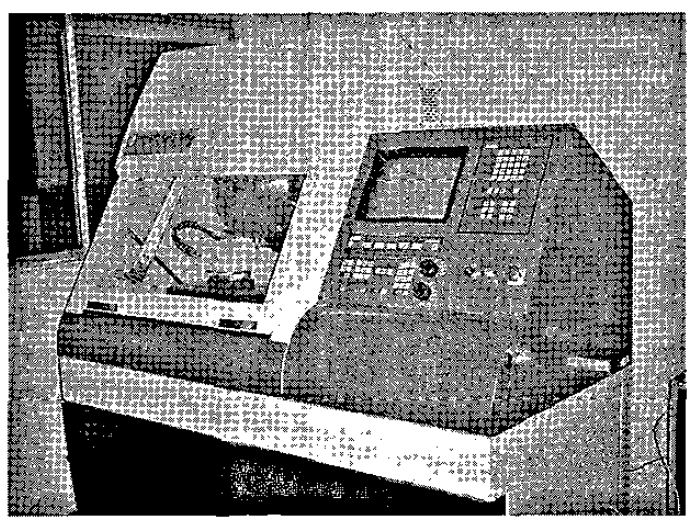


Figura 4.12 Centro de maquinado de control numérico EMCO PC MILL 125

La aplicación del control numérico abarca gran variedad de procesos. Dividiéndose las aplicaciones en dos categorías:

(1) Aplicaciones con máquina-herramienta, tales como el taladrado, laminado, torneado, etc.

(2) Aplicaciones sin máquina-herramienta, tales como el ensamblado, trazado e inspección. El principio de operación común de todas las aplicaciones del control numérico es el control de la posición relativa de una herramienta o elemento de procesado con respecto al objeto a procesar.

4.2.2 Estructura de sistema control numérico.

Definición de control numérico.

Existen diversas definiciones de lo que es un CN entre las que se pueden citar las siguientes:

1.- Es todo dispositivo capaz de dirigir posicionamientos de un órgano mecánico móvil, en el que las órdenes relativas a los desplazamientos del móvil son elaboradas a partir de las instrucciones codificadas en un programa. [17]

2.- Es todo dispositivo que realiza un mando mediante números, haciendo que las máquinas desarrollen su trabajo automáticamente mediante la introducción en su memoria de un programa en el que se definen las operaciones a realizar por medio de combinaciones de letras y números. [17]

3.- Son sistemas que, en base a una serie de instrucciones codificadas (programa), gobierna todas las acciones de una máquina o mecanismo al que le ha sido aplicado haciendo que éste desarrolle una secuencia de operaciones y movimientos en el orden previamente establecido por el programador. [17]

4.- Quizá la definición más clara en lo que se refiere al CN aplicado a las máquinas-herramienta sea la siguiente: "Sistema que aplicado a una máquina-herramienta automatiza y controla todas las acciones de la misma, entre las que se encuentran: los movimientos de los carros y del cabezal, el valor y el sentido de las velocidades de avance y de corte, los cambios de herramientas y de piezas a maquinar, las condiciones de funcionamiento de la máquina (bloqueos, refrigerantes, lubricación, etc.), el estado de funcionamiento de la máquina (averías, funcionamiento defectuoso, etc.), la coordinación y el control de las propias acciones del CN (flujos de información, sintaxis de programación, diagnóstico de su funcionamiento, comunicación con otros dispositivos, etc.)."De todo ello se deduce que los elementos básicos de un sistema de control numérico son, de carácter general". [17]

5.- El programa, que contiene la información precisa para que se desarrollen esas tareas. El programa se escribe en un lenguaje especial (código) compuesto por letras y números y se graba en un soporte físico (cinta magnética, disquete, etc.) o se envía directamente al control vía RS-232. [17]

6.- El CN, que debe interpretar las instrucciones contenidas en el programa, convertirlas en señales que accionen los dispositivos de las máquinas y comprobar su resultado. [17]

Tecnología de fabricación y tecnología de máquinas.

El equipo de procesado es el componente que realiza el trabajo útil, y lo forman la mesa de trabajo, las máquinas-herramienta así como los motores y controles para moverlas.

4.2.3 Clasificación de los Controles Numéricos.

Debido a las diferencias que existen entre las máquinas que son susceptibles de ser gobernadas por un CN, a las dificultades técnicas en el diseño de los controladores y a condicionantes de tipo económico, han aparecido diversos tipos de CN que pueden clasificarse de varias maneras:

a) Según el sistema de referencia
b) Según el control de las trayectorias
c) Según el tipo de accionamiento
d) Según el bucle de control
e) Según la tecnología de control

a) Clasificación según el sistema de referencia.

Para programar los sistemas de CN es necesario establecer un sistema de referencia estándar en el que puedan ser especificadas las diferentes posiciones relativas de la máquina-herramienta con respecto al trabajo a realizar. Para facilitar las cosas frente al programador se fija la pieza a ser maquinada a una mesa de trabajo mientras que la máquina-herramienta se mueve en torno a ella. De este modo el sistema de referencia se fija con respecto a la mesa de trabajo. Sistemas de referencia fijos frente a sistemas de referencia flotantes. El propósito de los sistemas de referencia es localizar la herramienta en relación con la pieza a ser maquinada. Dependiendo del tipo de máquina de CN el programador puede tener varias opciones para especificar esta localización. En el caso de sistemas de referencia fijos, el origen siempre se localiza en la misma posición con respecto a la mesa de trabajo. Normalmente, esta posición es la esquina inferior de la izquierda de la mesa de trabajo y todas las posiciones se localizan a lo largo de los ejes XY positivos y relativos a ese punto fijo de referencia. En el caso de sistema de referencia flotante, más común en las modernas máquinas de CN, permiten que el

operador fije el origen del sistema en cualquier posición de la mesa de trabajo. A esta característica se le llama origen flotante. El programador es el que decide donde debe estar situado el origen. Esta decisión corresponde a la conveniencia de la parte de la máquina.

b) Control de trayectorias.

Avances en la tecnología electrónica e informática, desplazan a los otros dos sistemas siendo el más utilizado en la mayor parte de las máquinas-herramienta. Los sistemas CN de contorneado controlan no sólo la posición final de la herramienta sino el movimiento en cada instante de los ejes y coordinan su movimiento usando técnicas de interpolación lineal, circular y parabólica. La denominación de continuo viene dada por su capacidad de un control continuo de la trayectoria de la herramienta durante el maquinado, y de contorneado por la posibilidad de realizar trayectorias definidas matemáticamente de formas cualesquiera obtenidas por aproximación. Este tipo de control de contorneado se aplica a tornos, fresadoras, centros de maquinado y, en general, a cualquier tipo de máquina que deba realizar maquinados según una trayectoria más o menos compleja.

c) Según el tipo de accionamiento.

Según el tipo de accionamiento pueden ser: hidráulicos, eléctricos o neumáticos.

d) Según el bucle de control.

El control del sistema se puede realizar de dos formas: en bucle cerrado, donde a través de sensores se mide el valor a la salida, y se compara en todo instante con un valor de referencia proporcionando una adecuada señal de control; o en bucle abierto donde no existe tal realimentación.

e) Clasificación según la tecnología de control.

Si se atiende a la clasificación según la forma física de realizar el control se encuentran los siguientes tipos de CN:

- Control Numérico (CN)
- Control Numérico Computarizado (CNC)
- Control Numérico Adaptativo (CNA)

Control Numérico (CN):

La denominación de Control Numérico (CN) se utiliza para designar aquellos controles donde cada una de las funciones que realiza el control son implementadas por un circuito electrónico específico únicamente destinado a este fin, realizándose la interconexión entre ellos con lógica cableada. Sus características principales son las de trabajar sin memoria, con una cinta perforada como medio de introducción del programa que se ejecuta de forma secuencial. Los armarios de control son de gran volumen y difícil mantenimiento.

Control Numérico Computarizado (CNC):

El tipo de controles basados en circuitos específicos y lógica cableada esta fuera de uso con la aparición de los Controles Numéricos Computarizados (CNC), basados en el uso de uno o varios microprocesadores que sustituyen a los circuitos de lógica cableada de los sistemas CN, poco fiables y de gran tamaño. Los CNC incluyen una memoria interna de semiconductores que permite el almacenamiento del programa de la pieza, de los datos de la máquina y de las compensaciones de las herramientas. Por otra parte, incorporan un teclado que facilita la comunicación y el grado de interactividad con el operario y permiten la ruptura de la secuencia de los programas, la incorporación de subrutinas, los saltos condicionales y la programación paramétrica. De esta forma, se facilita una programación más estructurada y fácil de aprender. Por otra parte, se trata de equipos compactos con circuitos integrados, lo que aumenta el grado de fiabilidad del control y permite su instalación en espacios reducidos y con un nivel de ruido elevado. Actualmente, todos los controles que se fabrican son del tipo CNC, quedando reservado el término CN para una referencia genérica sobre la tecnología, de tal forma que se utiliza la denominación CN para hacer referencia a todas las máquinas de control numérico, tengan o no computador.

Control Numérico Adaptativo (CNA):

El CNA es la tendencia actual de los controles. En ellos el controlador detecta las características del maquinado que está realizando y en función de ellas optimiza las velocidades de corte y los avances; en otras palabras, adapta las condiciones teóricas o programadas del maquinado a las características reales del mismo. Para ello, hace uso de sistemas sensoriales de fuerza y deformación en la herramienta, par torsional, temperatura de corte, vibraciones, potencia, etc. Las razones de la introducción del CNA residen en la variación de las condiciones de corte durante el maquinado por varios motivos:

- Geometría variable de la sección de corte (profundidad y anchura) por la complejidad de la superficie a maquinar, típico de las operaciones de contorneo.
- Variaciones en la dureza y en la maquinabilidad de los materiales.
- Desgaste de las herramientas, incrementándose el esfuerzo de corte.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DEL CONTROL NUMÉRICO.

El uso de la tecnología del CN aplicada a las máquinas-herramienta presenta una serie de ventajas y desventajas que se pueden resumir como sigue:

a) Ventajas.

Entre las ventajas podemos mencionar las siguientes:

- Reducción de los tiempos de fabricación, ya que los tiempos muertos se reducen al encadenarse de forma automática los movimientos, por la rapidez de los movimientos en vacío y por el control automático de las velocidades del cabezal.

- Los tiempos de control y medida disminuyen debido a la elevada precisión de los maquinados y a la reproducción fiel de las cotas a partir de la primera pieza.

- Los tiempos de cambio de pieza también se reducen.

- Los tiempos de espera entre máquinas bajan, al poder realizar sobre una misma máquina mayor número de operaciones que con las convencionales; esto se relaciona con la disminución de la superficie ocupada de taller.

- Se reduce el número de verificaciones entre operaciones.

- Reducción del tamaño del lote económico y, por lo tanto, del nivel de almacenes.

- Aumento de la flexibilidad de producción expresada en términos de fácil adaptabilidad a la realización de distintos tipos de fabricados, respondiendo ágilmente a las necesidades del mercado.

- Disminución de rechazos de piezas, como consecuencia de la precisión de las máquinas.

- Mayor duración de las herramientas, debido a su mejor aprovechamiento.

- Supresión de ciertas herramientas y disminución del número de herramientas de forma (ahorro de herramientas y utillaje); se utilizan herramientas más universales.

- Supresión del trazado de piezas antes del maquinado. Ahorro de utillaje, al realizar en una misma máquina mayor número de operaciones.

b) Desventajas.

Entre las desventajas podemos citar:

- Costo elevado por la importante inversión de adquisición de una Máquina-Herramienta de Control Numérico (MHCN), debido no sólo al precio de la MHCN sino también al de los elementos auxiliares. Ello obliga a asegurar un alto nivel de

ocupación de la máquina y la puesta a varios turnos del equipo para conseguir una amortización razonable.

- Necesidad de un personal mayormente calificado en programación y mantenimiento, lo que se traduce en mayores costos en formación y en salarios. Alto costo del servicio postventa y de mantenimiento de los equipos en razón de su mayor complejidad. Se estima que el costo de mantenimiento de una MHCN es un 50% más elevado que en las convencionales.

4.2.4 Sistema de control.

La arquitectura del sistema de control de un Control Numérico comprende los siguientes elementos:

- Unidad de entrada-salida de datos.
- Unidades de memoria fija (ROM) y volátil (RAM).
- Uno o varios microprocesadores.
- Visualizador de datos.
- Unidad de enlace con la máquina.

a) Unidad de entrada-salida de datos.

La entrada y salida de datos en los equipos de CN se puede realizar de varias formas:

- Por cinta perforada (ya obsoleto).
- Por panel de control.
- Por cintas magnéticas (tipo cassette), ya en desuso y sustituidas por disquetes informáticos.
- Por comunicación con un ordenador externo.

La aparición del CNC ha hecho posible la introducción de datos de una manera más cómoda mediante el uso de otros periféricos conectados al CN. Uno de ellos es el panel de control que han incorporado la mayor parte de los CN modernos. Este panel de control lleva incorporado un teclado y una serie de selectores y pulsadores que abarcan todas las informaciones codificadas necesarias para la programación. Este panel se emplea para realizar modificaciones sobre los programas introducidos previamente en memoria, para programar a pie de máquina y para controlar y verificar el funcionamiento de la máquina-herramienta.

Clasificación de tipos de máquinas CNC.

La observación de la geometría de componentes producidos por máquinas-herramienta CNC (Véase figura 4.13) muestra que los requisitos básicos en el control del carro son para capacidad posicional, lineal y de contornos. En la figura 4.14 se muestran ejemplos de tipos de máquinas y equipos que corresponden a estas categorías. Obsérvese que algunos procesos, por ejemplo, la soldadura, entran en más de un grupo.

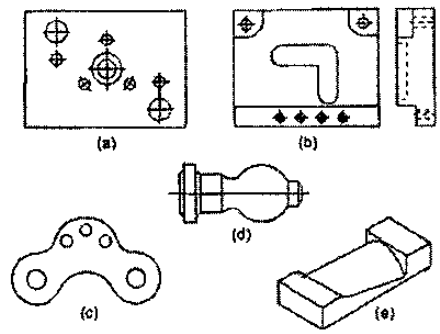


Figura 4.13 Ejemplos de piezas de trabajo en máquinas-herramientas CNC a) Posicional; b) Control de movimientos en línea; c) contorneado (2D); e) contorneado (3D)

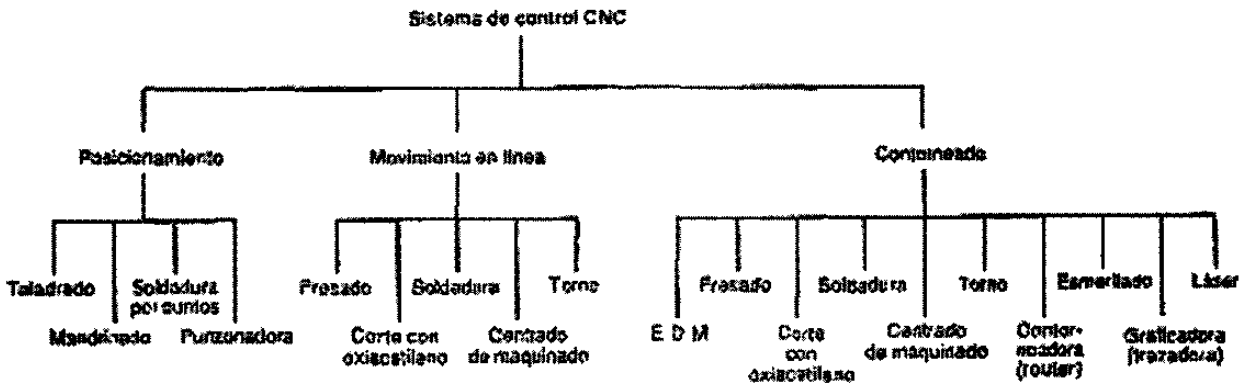


Figura 4.14 Clasificación de tipos de control para desplazamientos de carro en una variedad de máquinas-herramienta y equipo CNC

1. *Control posicional.* Dos carros ortogonales se mueven rápidamente a una posición fija en la que se realiza un maquinado, por ejemplo, taladrado, mandrinado o perforación de un agujero. La trayectoria seguida por los carros para llegar a la posición deseada debe ser la ruta más rápida posible, ya que de otra manera no tiene importancia a menos que haya obstrucciones (Por ejemplo, una abrazadera) que deban eliminarse. Esta clase de control de carros se conoce como 2D.

2. *Control de movimiento lineal.* Los carros se pueden desplazar con rapidez para afines de posicionamiento, como ejemplo en (1), pero también son capaces de ser controlados para moverse a la velocidad de avance, ya sea de manera individual o simultanea, para que se puedan hacer cortes rectos. La designación es 2L o 3L para control lineal en dos o tres ejes respectivamente, y se puede extender a 4L, etc.

3. *Control de contorno.* El maquinado de algunos componentes exige que los carros se desplacen de manera simultánea en una relación no lineal, y necesita sistemas de control capaces de aceptar y procesar información detallada y compleja. Esta información es necesaria para definir la trayectoria del cortador requerida para obtener la forma geométrica deseada. Este proceso incluye el control de velocidades, aceleraciones y desaceleraciones de los carros a lo largo de sus ejes respectivos. En la figura 4.15 se ilustra un ejemplo sencillo de velocidades de carro que cambian constantemente cuando se máquina un arco. El ejemplo más común de este tipo de control se designa como 2 ½D; es decir, el husillo en el eje Z tiene un sistema lineal de control (L), pero los otros dos ejes, X e Y, tiene un sistema de control tipo continuo (2D) capaz de manejar información no lineal. El control continuo de movimiento para procesos de contorno sé amplia 3 ejes (3D) o más para máquinas y equipos complejos.

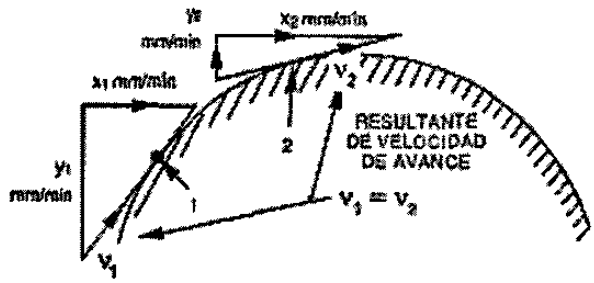


Figura 4.15 Para mantener una velocidad constante de avance al fresar una curva, se necesita variar la velocidad del carro en X y Y, es decir, X a X_2; Y a Y_2

Interpolación para generación de contornos.

Para producir curvas suaves, sin puntos angulares, cuando se maquinan contornos con máquinas CNC, se siguen puntos en las superficies en una secuencia de movimientos de carros que son posibles por un sistema de interpolación. El sistema de control de una máquina CNC asegura movimientos de carros relacionados entre sí a las velocidades necesarias para alcanzar la forma geométrica deseada del componente. Pendientes y arcos de círculos están entre las figuras más comunes que necesitan de este sistema, y los dos sistemas de interpolación comunes que se utilizan son el lineal y el circular, definidos en la norma BS3635 [21]:

1. Interpolación lineal. Modo de control de contornos que producen una operación en pendiente o línea recta, que utiliza datos de un solo bloque para producir velocidades proporcionales a las distancias por desplazar en dos o más ejes simultáneamente.

2. Interpolación circular. Modo de control de contornos que utilizan los datos de un solo bloque para producir un arco de circulo; las velocidades de los movimientos en dos ejes empleados para generar este arco se pueden variar mediante el sistema de control.

Desplazamiento de carros de máquinas-herramientas.

Para desplazar un carro de una máquina-herramienta mediante un sistema de control, es esencial una rápida respuesta de carros y elementos giratorios de impulsión a las señales de entrada (véase figura 4.16) y, aún así, para resistir cargas pesadas y fuerzas en el corte de metal, es necesaria una robusta construcción de la máquina.

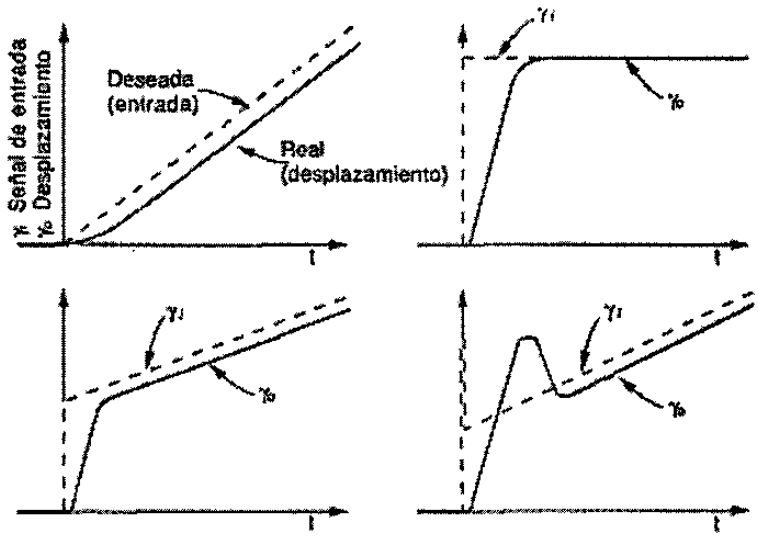


Figura 4.16 Ejemplos de señales de entrada y condiciones reales de respuesta

Para satisfacer estas necesidades antagónicas se ha modificado y perfeccionado el tradicional diseño de máquinas-herramienta; por ejemplo, las fuerzas de fricción se reducen por la sustitución de rodamientos en lugar de cojinetes de deslizamiento en correderas y tuercas de tornillos de avance, con lo que se reducen cargas y es posible que algunos componentes del sistema de impulsión, como son embragues, engranajes y ejes se reduzcan en sus dimensiones.

Por estos medios se reduce la inercia del sistema, se emplean sistemas de impulsión de menor potencia y se reduce al mínimo el costo de componentes de diseño avanzado.

En el control de elementos de carros portaherramientas debe hacerse una distinción entre sistemas de impulsión para desplazar físicamente el carro, y sistemas de alimentación para supervisar la posición del carro (sistemas de lazo cerrado). Esta distinción se ilustra en la figura 4.17, y ejemplos de control de lazo abierto y cerrado se muestran en la figura 4.18, un transductor se necesita para supervisar el desplazamiento

de carros. Puede recibir su entrada desde un elemento giratorio del sistema de impulsión, por ejemplo, el tornillo de avance, en cuyo caso la precisión puede ser afectada por errores del tornillo de avance, enrollado, deslizamiento axial, etc.; o de un transductor lineal, por ejemplo, retículas ópticas o interferómetros de láser, y puede vigilar desplazamientos directamente desde el carro mismo. En todos los casos, el sistema debe ser capaz de vigilar desplazamientos de carros (y velocidad en el caso de máquinas para contornear) sobre largas distancias de carrera y a un alto grado de precisión.

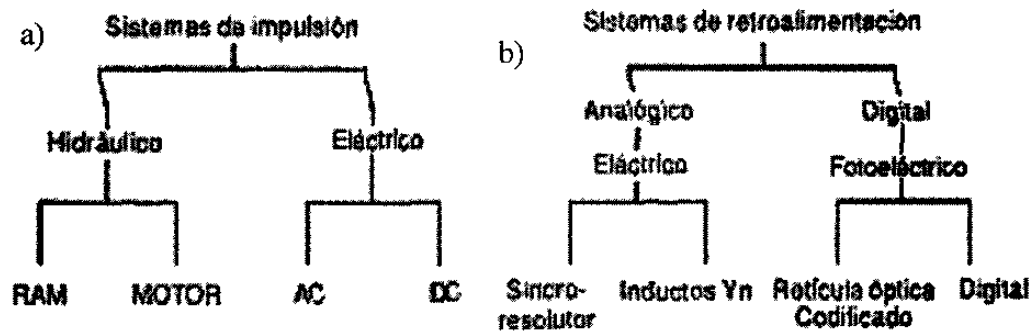


Figura 4.17 a) Tipos de sistemas de impulsión para desplazar carros de máquinas-herramientas, b) Ejemplos de métodos analógicos y digitales para obtener alimentación en la Posición del carro

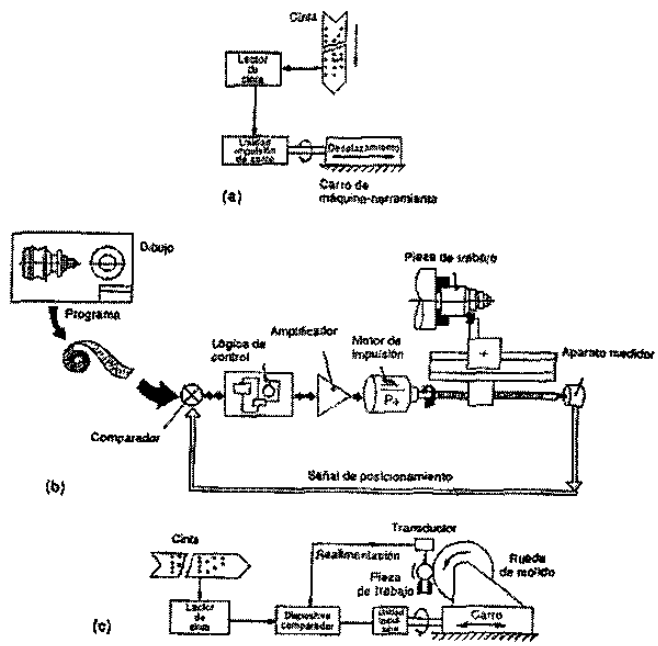


Figura 4.18 Secciones de lazo abierto y cerrado para controles de carro de máquina-herramienta. a) Lazo abierto; b) sistema de control de lazo cerrado; c) lazo cerrado basado en medición de la pieza de trabajo en proceso

4.3 Maquinabilidad.

Las propiedades del material de trabajo tienen una influencia significativa sobre el éxito de la operación de maquinado. Estas propiedades y otras características del trabajo se resumen frecuentemente en el término maquinabilidad, que denota la facilidad relativa con la cual se puede maquinar un material (por lo general metal) usando las herramientas y las condiciones de corte apropiadas.

Para evaluar la maquinabilidad se utilizan varios criterios y los más importantes son los siguientes:

1) Vida de la herramienta,
2) Fuerzas y potencia,
3) Acabado superficial,
4) Facilidad de eliminación de la viruta.

Aunque la maquinabilidad se refiere generalmente al material de trabajo, debe reconocerse que el buen desempeño del maquinado no depende solamente del material. El tipo de operación de maquinado, la herramienta y las condiciones de corte son también factores importantes, así como las propiedades del material. Además, el criterio de maquinabilidad es también una fuente de variación. Un material puede prolongar la vida de la herramienta, mientras que otro suministra un mejor acabado superficial. Todos estos factores hacen difícil la evaluación de la maquinabilidad.

El ensayo de la maquinabilidad implica generalmente una comparación de materiales de trabajo. El desempeño del maquinado de un material de prueba se mide en relación con el material base (estándar). Las medidas posibles de desempeño en el ensayo de la maquinabilidad incluyen:

1) La vida de la herramienta,
2) El desgaste de la herramienta,
3) La fuerza de corte,
4) La potencia en la operación,
5) La temperatura de corte,
6) La velocidad de remoción del material bajo las condiciones estándar de la prueba.

El desempeño relativo se expresa como un número índice llamado índice de maquinabilidad (IM). Al material base que se utiliza como estándar se le da un índice de maquinabilidad de 1.00. El acero B 1112 se usa frecuentemente como material base en las comparaciones de maquinabilidad. Los materiales más fáciles de maquinar que la base tienen índices mayores de 1.00. Los índices de maquinabilidad se expresan frecuentemente como porcentajes en lugar de números índices.[20]

Muchos materiales de trabajo y sus factores afectan el desempeño del maquinado. Las propiedades mecánicas de un material de trabajo que afectan la maquinabilidad incluyen la dureza y la resistencia. Al incrementarse la dureza, aumenta el desgaste

abrasivo y la vida de la herramienta se reduce. La resistencia se indica por lo general como resistencia a la tensión, aún cuando el maquinado implica esfuerzos cortantes. Al aumentar la resistencia del material, se incrementan las fuerzas de corte, la energía específica y la temperatura de corte, haciendo que el material sea más difícil de maquinar. Por otro lado, una dureza muy baja puede ir en detrimento del desempeño del maquinado. Por ejemplo, el acero al bajo carbono, cuya dureza es relativamente baja, con frecuencia es demasiado dúctil para poder maquinarlo bien. La alta ductilidad causa desgarramientos del metal al formarse la viruta y produce un pobre acabado y problemas con la eliminación de la viruta. Frecuentemente se usa el estirado en frío de las barras de bajo carbono para incrementar su dureza superficial y propiciar el rompimiento de la viruta durante el corte.

La composición química de un metal tiene un efecto importante sobre las propiedades, y en algunos casos afecta los mecanismos de desgaste que actúan sobre el material de la herramienta. La composición química afecta la maquinabilidad a través de estas relaciones. El contenido de carbón tiene un efecto significativo sobre las propiedades del acero. Al incrementarse el carbón, aumentan la resistencia y la dureza del acero; esto reduce el desempeño del maquinado. Muchos elementos de aleación que se añaden al acero para mejorar sus propiedades van en detrimento de la maquinabilidad. El cromo, el molibdeno y el tungsteno forman carburos en el acero, lo cual incrementa el desgaste de la herramienta y reduce la maquinabilidad. Se pueden añadir ciertos elementos al acero para mejorar su desempeño en el maquinado, como son plomo, azufre y fósforo. Estos aditivos tienen el efecto de disminuir el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta, por tanto reducen las fuerzas, la temperatura y la formación de acumulación en el borde. Estos efectos proporcionan una mejor vida de la herramienta y un mejor acabado superficial. Las aleaciones de acero formuladas para mejorar la maquinabilidad se conocen como *aceros de maquinado libre.*[21]

4.4 Selección de las condiciones de corte.

Un problema práctico en maquinado es seleccionar las condiciones de corte apropiadas para una operación dada. Ésta es una de las tareas de planeación de procesos. Para cada operación se deben tomar decisiones acerca de la máquina-herramienta, de la herramienta de corte y de las condiciones de corte. Estas decisiones deben considerar la maquinabilidad de la parte de trabajo, la geometría de la parte, el acabado superficial y así sucesivamente.

4.4.1 Selección del avance y de la profundidad de corte.

Las condiciones de corte en una operación de maquinado consisten en la velocidad, el avance, la profundidad de corte y el fluido para corte (si se usa o no, y qué tipo de fluido). El factor dominante en la elección sobre los fluidos para corte son generalmente

las consideraciones sobre las herramientas). La profundidad de corte se predetermina frecuentemente por la geometría de la pieza de trabajo y la secuencia de operación. Muchos trabajos requieren una serie de operaciones de desbaste seguidas de una operación final de acabado. En las operaciones de desbaste, la profundidad se hace tan grande como sea posible dentro de las limitaciones de la potencia disponible, la máquina-herramienta, la rigidez de la instalación, la resistencia de la herramienta de corte y otros factores. En el corte de acabado, se fija la profundidad para alcanzar las dimensiones finales de la parte.

El problema se reduce entonces a la selección del avance y de la velocidad. En general, los valores de estos parámetros deben decidirse en orden, primero el avance *y* segundo la velocidad. La determinación de la velocidad de avance apropiada para una operación de maquinado depende de los siguientes factores:

Herramienta. ¿Qué tipo de herramienta se usará? Los materiales más duros de herramienta (carburos cementados, cerámicos y similares) tienden a fracturarse más fácilmente que los, aceros de alta velocidad. Estas herramientas se usan normalmente a velocidades de avance lentas. Los aceros de alta velocidad pueden tolerar velocidades de avance más altas debido a su mayor *tenacidad*.

Desbaste o acabado. Las operaciones de desbaste implican altas velocidades; las operaciones de acabado implican avances lentos

Restricciones del avance en desbaste. Si la operación es desbaste, ¿a qué altura se puede fijar la velocidad de avance para maximizar la velocidad de remoción de metal?, el avance se debe fijar tan alto como sea posible. Los límites más altos en el avance son impuestos por las fuerzas de corte, la rigidez de la instalación y algunas veces la potencia.

Requerimientos del acabado superficial. Si la operación es el acabado ¿cuál es el acabado superficial que se desea?, el avance es un factor importante en el acabado superficial, se pueden usar cálculos para estimar el avance que producirá un acabado superficial deseado.

4.4.2 Optimización de la velocidad de corte.

La selección de la velocidad de corte se basa en aprovechar mejor la herramienta de corte particular, lo cual significa normalmente escoger una velocidad que rinda una alta velocidad de remoción de material y que sea conveniente para una vida larga de la herramienta.

Se han derivado fórmulas matemáticas para determinar la velocidad óptima de corte para una operación de maquinado, dado que se conocen los tiempos y los componentes

de costo de la operación. Las fórmulas permiten calcular las velocidades óptimas de corte para alcanzar dos objetivos:

1) Máxima velocidad de producción,
2) Mínimo costo por unidad.

Ambos objetivos buscan lograr un balance entre la velocidad de remoción de material y la vida de la herramienta. En consecuencia, se ha establecido el avance, la profundidad de corte y el material de trabajo.

Maximización de la velocidad de producción. Para maximizar la velocidad de producción, se determina la velocidad que minimiza el tiempo de maquinado por unidad de producción. Minimizar el tiempo de corte por unidad es equivalente a maximizar la velocidad de producción. Este objetivo es importante en casos donde las órdenes de producción se deben terminar tan rápido como sea posible.

En el torneado existen tres etapas que contribuyen a la duración del ciclo de producción de una parte:

1)Tiempo de manejo de la parte *Th*. Éste es el tiempo que toma el operador para cargar la parte en la máquina-herramienta al principio del ciclo de producción y descargar la parte después de completar el maquinado.

2)Tiempo de maquinado *Tm*. Es el tiempo real en que la herramienta desempeña el maquinado durante el ciclo.

3)Tiempo de cambio de la herramienta *Tt*. Al final de la vida de la herramienta, ésta debe cambiarse, lo cual toma tiempo. Este tiempo debe dividirse entre el número de partes que se produjeron durante la vida de la herramienta. Sea *np* = número de piezas cortadas durante la vida de la herramienta (número de piezas que se cortan con un borde de corte hasta que la herramienta se cambia). Entonces, el tiempo de cambio de la herramienta por parte = Tt/np. Con la suma de estos tres elementos de tiempo se obtiene el tiempo total por unidad de producto para el ciclo de operación:

$$Tc = Th + Tm + Tt/\mathrm{np} \qquad (33)$$

donde Tc = tiempo del ciclo de producción por pieza, min.

El tiempo del ciclo Tc está en función de la velocidad de corte. Al incrementarse la velocidad de corte, Tm disminuye y *Tt /np* aumenta; *Th* no es afectada por la velocidad. Ver figura 4.19.

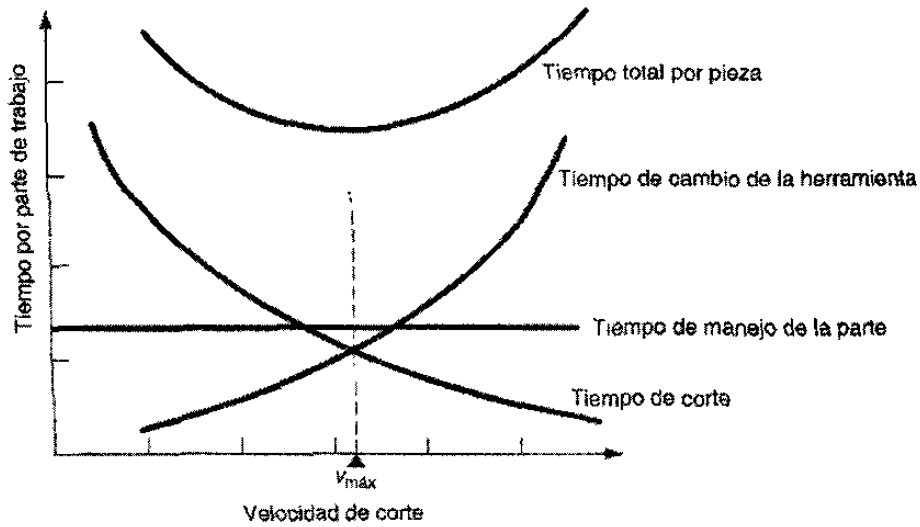


Figura 4.19 Tiempo de ciclo de la pieza en relación con la velocidad de corte

El tiempo total por cada parte se minimiza a un cierto valor de velocidad de corte. Esta velocidad óptima se puede identificar con un rearreglo matemático de la ecuación como una función de la velocidad. Se puede demostrar que el tiempo de maquinado en la operación de torneado recto está determinada por:

$$Tm = (\pi DL / vf) \qquad (34)$$

Donde: Tm = tiempo de maquinado, min;
D = diámetro de la parte de trabajo, mm;
L = longitud de la parte de trabajo, mm;
f = avance, mm/rev; y
v = velocidad de corte mm/min.

Minimización del costo por unidad. Para el mínimo costo por unidad se determina la velocidad que minimiza el costo de producción por unidad de producto. Cuando se derivan las ecuaciones para este caso, empezamos con los cuatro componentes de costo que determinan el costo total por unidad durante una operación de torneado. Ver figura 4.20:

1) Costo del tiempo de manejo de la parte. Es el costo del tiempo que ocupa el operador cargando y descargando la parte. Sea *Co* = tasa de costo (por ejemplo $/min) para el operador y la máquina. Entonces el costo de tiempo de manejo de la parte = *CoTh*.

2) Costo del tiempo de maquinado. Es el costo del tiempo que toma la herramienta para hacer el maquinado. Usando otra vez *Co* para representar el costo por minuto del operador y de la máquina-herramienta, el costo de tiempo de corte = *Co Tm*.

3) Costo del tiempo de cambio de herramienta. Es el costo del tiempo de cambio de herramienta = *Co Tt /np*.

4) Costo de la herramienta. Además del tiempo de cambio de la herramienta, la herramienta en sí tiene un costo que debe añadirse al costo total de operación. Éste es el costo por borde de corte *Ct*, dividido por el número de piezas maquinadas con ese borde de corte *np* Entonces el costo de la herramienta por unidad de producto está dado por *Ct/np*.

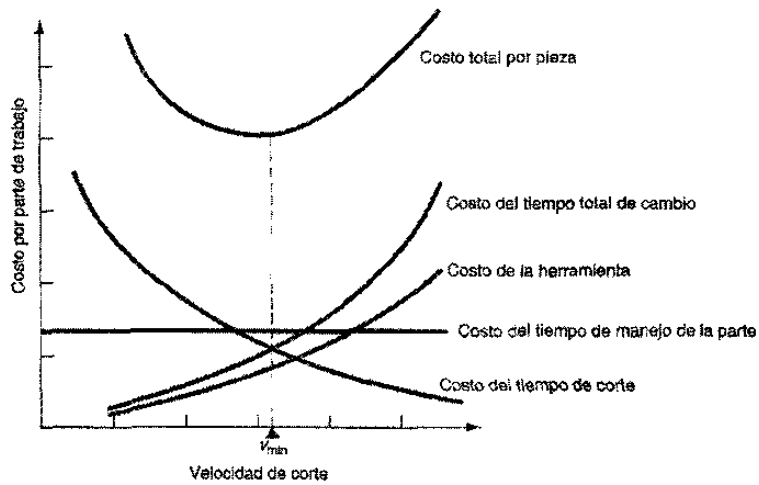


Figura 4.20 Costo de la pieza en relación con la velocidad de corte

CAPÍTULO 5

METROLOGÍA SUPERFICIAL RUGOSIDAD.

5.1 Introducción.

Una superficie perfecta solo existe en la mente, ya que cualquier superficie real, por perfecta que parezca, presentará irregularidades que se originan durante el proceso de fabricación.

Las irregularidades mayores (macrogeométricas) son errores de forma asociados con la variación en tamaño de una pieza, paralelismo entre superficies y planitud de una superficie o conicidad, redondez y cilindricidad y que pueden medirse con instrumentos convencionales.

Las irregularidades menores (microgeométricas) son la ondulación y la rugosidad. La primera pueden ocasionarla la flexión de la pieza durante el maquinado, falta de homogeneidad del material, liberación de esfuerzos residuales, deformaciones por tratamiento térmico, vibraciones, etc. La segunda la provoca el elemento utilizado para realizar el maquinado, por ejemplo, la herramienta de corte o la piedra de rectificado.

La figura 5.1 tomada de la norma ANSI/ASME 46.1-1995 [22] muestra los rangos típicos de valores de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción.

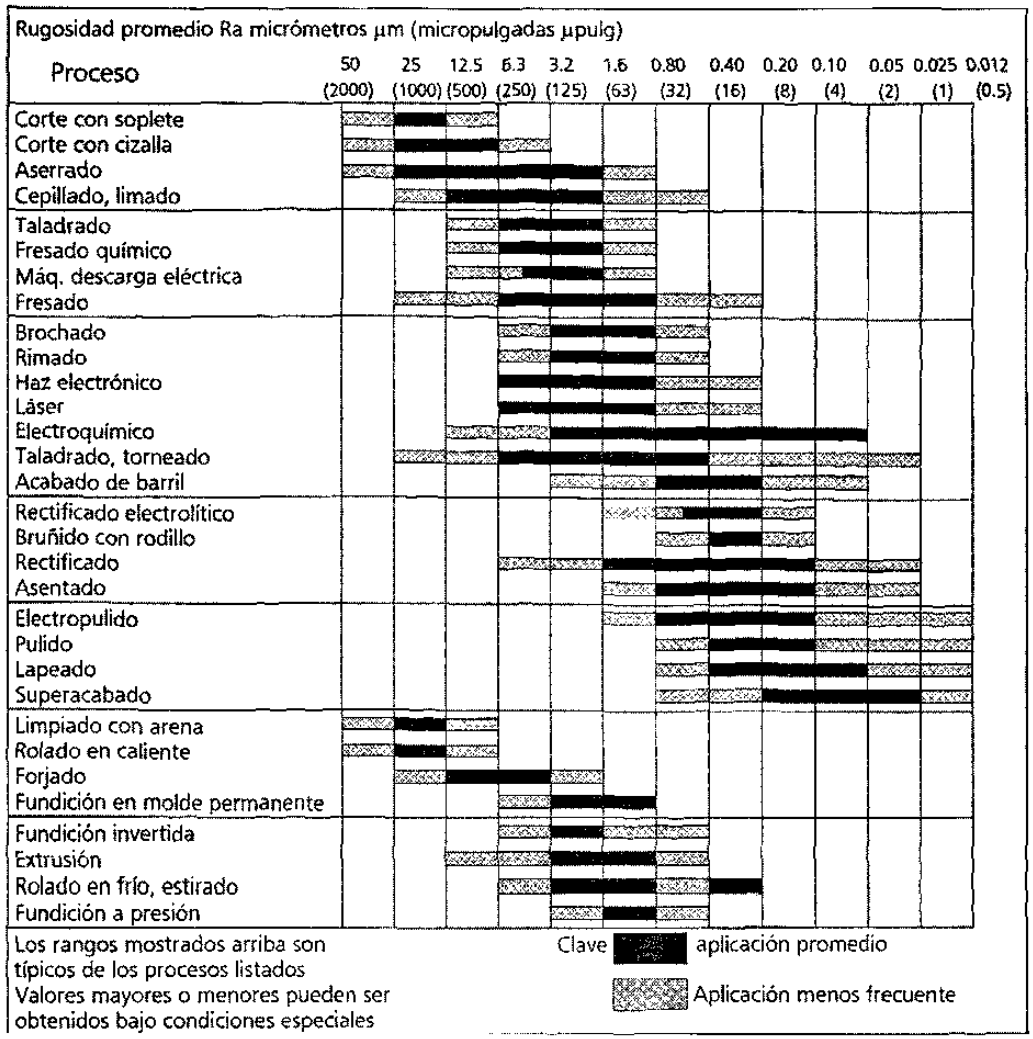


Figura 5.1 Rangos de rugosidad superficial que pueden obtenerse mediante métodos comunes de producción

En el pasado, el mejor método práctico para decidir si un acabado superficial cumplía con los requerimientos era compararlo visualmente y mediante el tacto contra muestras con diferentes acabados superficiales (figura 5.2). Este método no debe confundirse con los patrones de rugosidad que actualmente se usan en la calibración de rugosímetros.

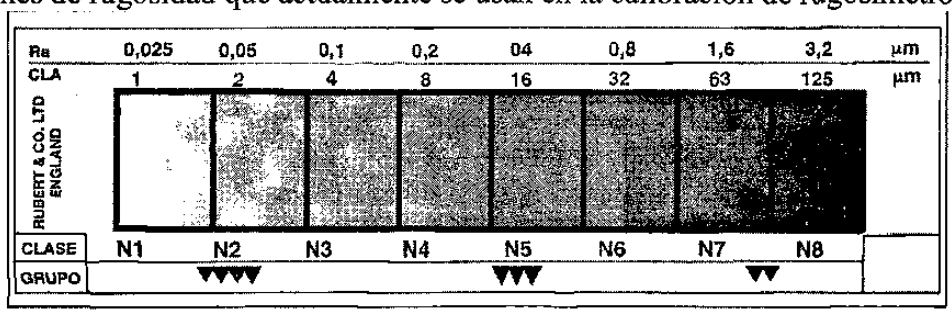


Figura 5.2 Lámina con diferentes acabados superficiales

La desventaja de la comparación visual táctica es que la decisión es subjetiva y difícilmente dos personas estarán de acuerdo en que superficies son aceptables y cuales no, sobre todo si uno es comprador y otro proveedor.

Afortunadamente, el avance de la industria electrónica durante el último cuarto de siglo ha hecho posible contar con los rugosímetros. Estos instrumentos son fáciles de operar, portátiles, económicos, inmunes a las condiciones ambientales adversas del taller y proporcionan con rapidez los datos, incluso el registro e impresión de estos.

El método de medición de la rugosidad más popular en la actualidad es el que se basa en el palpador de diamante con un radio en la punta de 2.5 o 10μm que recorre una pequeña longitud, denominada longitud de muestreo (*le*), sobre la superficie localizada. Los valores normalizados para esta longitud de muestreo son, 0.08, 0.25, 2.5, 8 y 25mm.

En la práctica se utiliza la longitud de evaluación, la cual puede ser una, tres o cinco veces la longitud de muestreo; este último valor es el más común. La longitud de recorrido será un poco mayor que la de evaluación, ya que si el palpador está en reposo se requiere recorrer una pequeña longitud antes de alcanzar la velocidad normal de recorrido y después realizar un recorrido adicional para que el palpador alcance nuevamente el reposo. (Figura 5.3). Una vez realizada la evaluación, el palpador regresa con una velocidad mayor al punto de origen, preparándose así para una nueva medición.

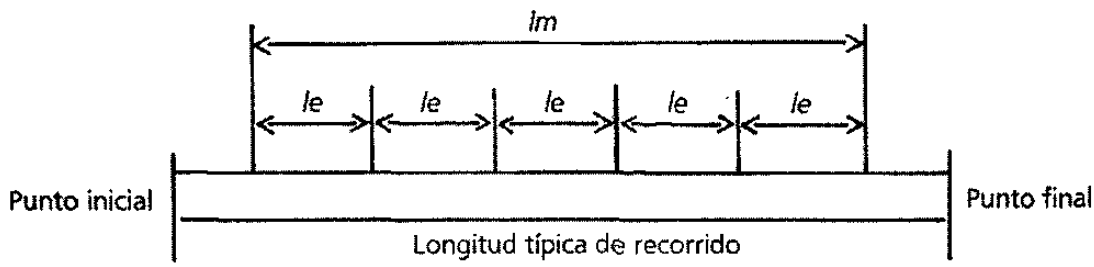


Figura 5.3 Longitud que recorre el palpador durante la medición

La figura 5.4 tomada de la norma ANSI/ASME B46.1 - 1985 [23] ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas unidireccionales originadas por el proceso de maquinado utilizado y cierta ondulación de la superficie, al amplificar esta superficie se observara con mayor claridad la ondulación, pero se verán otras irregularidades más pequeñas superimpuestas. Con otra amplificación se obtiene la rugosidad; a las partes altas se les denomina picos y a las bajas valles. Esta forma de examinar el acabado superficial se denomina método de perfil.

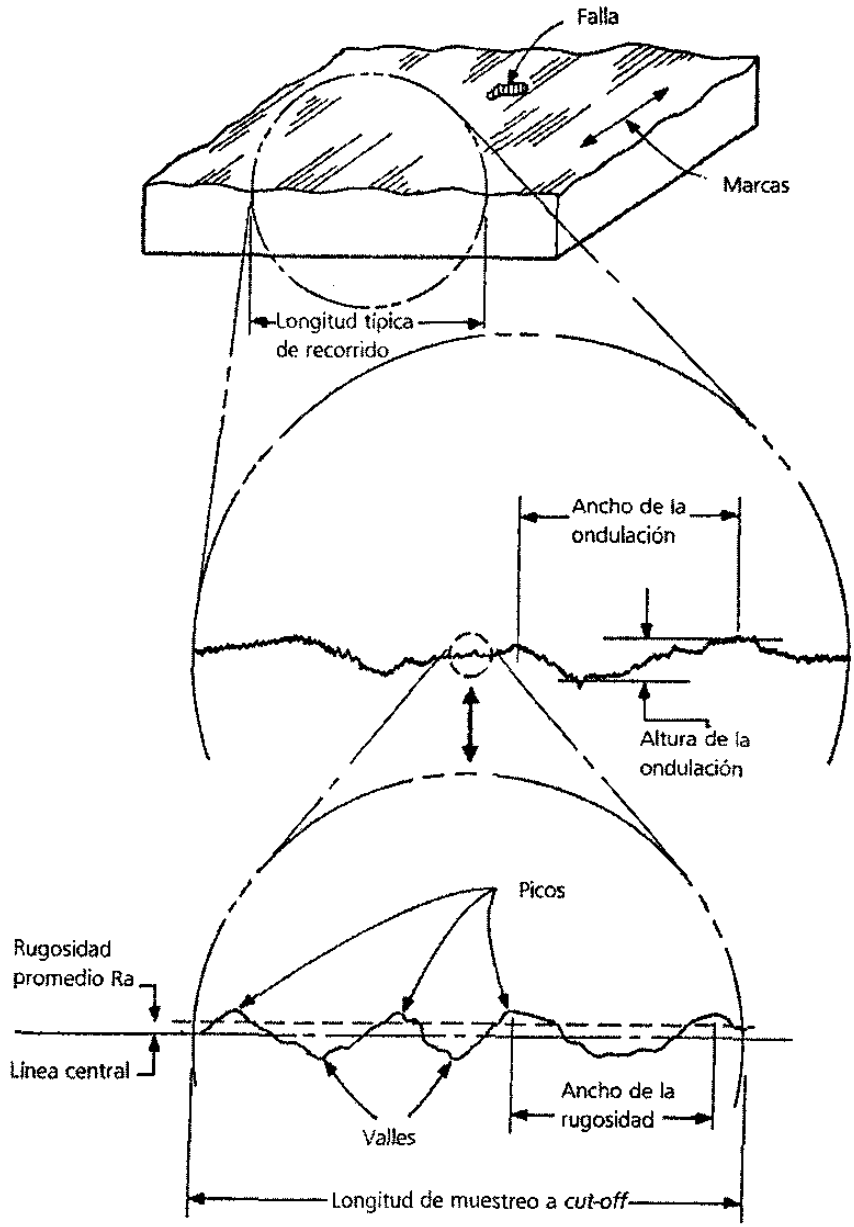


Figura 5.4 ***Ilustra la superficie de una pieza en la que se observan marcas originadas por el maquinado, también se muestra la amplificación de la superficie donde se observan las irregularidades más claramente.***

5.2 Las curvas P Y R.

Existen dos tipos de curvas importantes cuando se evalúa la rugosidad por el método de perfil: la P y la R. La curva P (perfil sin filtrar) es un perfil resultante de la intersección de una superficie con un plano perpendicular. A menos que se especifique otra circunstancia, la intersección debe de ser en la dirección en la cual el perfil representa el máximo valor de la rugosidad de la superficie; por lo general es en la dirección perpendicular a las marcas del maquinado sobre la superficie (figura 5.5).

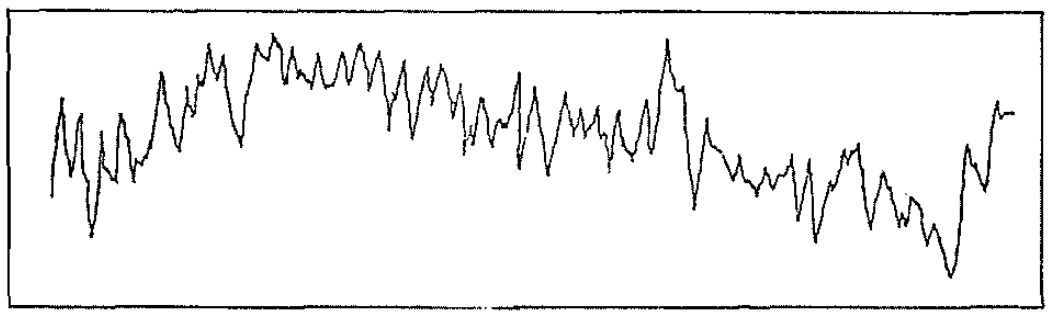


Figura 5.5 Curva P (perfil de rugosidad sin filtrar)

La curva ***R*** (perfil de rugosidad) es un perfil que se obtiene de la curva **P** removiendo los componentes de ondulación de baja frecuencia, cuyas longitudes de onda son mayores que un limite especificado de la longitud de onda llamado valor ***cut-off*** (λC) (figura 5.6).

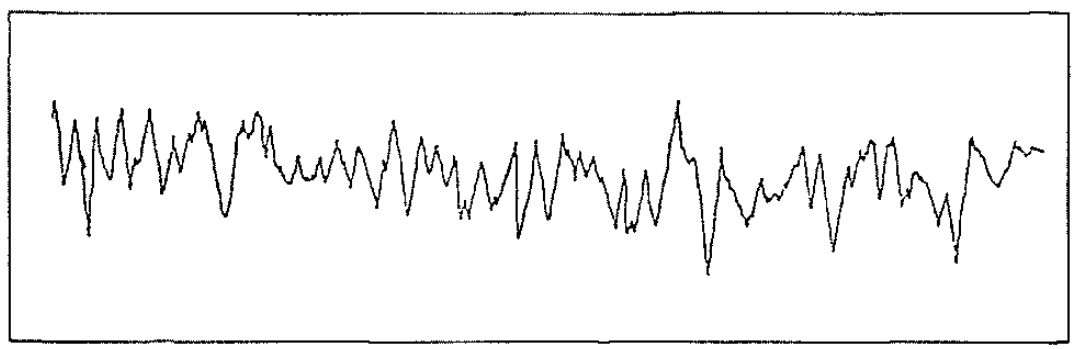


Figura 5.6 Curva R (perfil de rugosidad)

En los rugosímetros la longitud de muestreo se varía por medio de filtros que modifican la frecuencia de respuesta del amplificador y, por lo tanto, la forma de onda del perfil para dar lo que se denomina valor de ***cut-off.***

El ***cut-off*** es el medio a través del cual el perfil resultante de la forma de onda simula la restricción de la evaluación de la longitud de muestreo. Por conveniencia el cut-off es citado como la longitud de muestreo equivalente.

Una línea de referencia con las forma del perfil geométrico y que divide al perfil de modo que, dentro de la longitud de muestreo, la suma de los cuadrados de los alejamientos del perfil desde esta línea es un mínimo, se denomina línea media.

Las medidas de la rugosidad por el método de perfil están basadas en una línea central que es paralela a la línea medida del perfil a través de la longitud de evaluación, de modo que dentro de esta longitud la suma de las áreas limitadas por la línea central y el perfil es igual en ambos lados (figura 5.7).

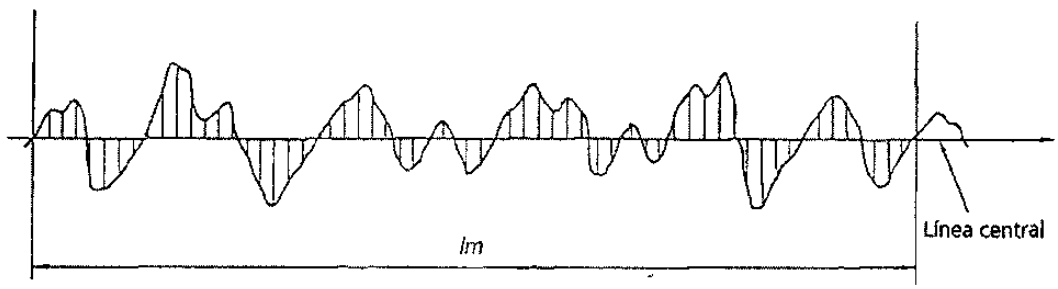


Figura 5.7 Muestra la línea media

5.2.1 Definición de Ra.

La definición de ***Ra*** equivale, en términos prácticos, a la altura de un rectángulo de longitud (lm) cuya área es igual, dentro de la longitud de evaluación, a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central. Esto se representa mediante el procedimiento mostrado en la figura 5.8; así ***Ra*** es la rugosidad promedio (también denominada CLA por promedio de línea central en sus siglas en inglés, aunque en el pasado también se utilizo el termino AA por promedio aritmético.).

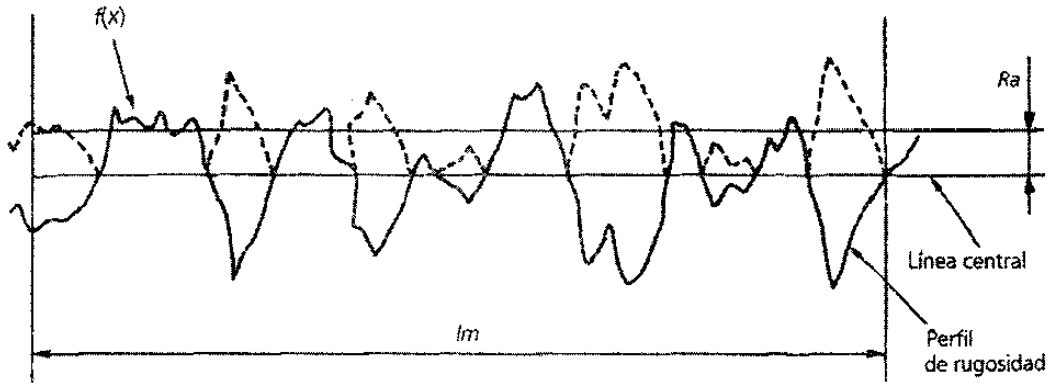


Figura 5.8 Forma en la que se mide la rugosidad Ra

Ra es el único parámetro de este tipo definido en la Norma de Estados Unidos, Canadá, Países Bajos y Suiza. También esta bien definido en las normas de todos los países industrializados y en las normas internacionales ISO, por lo tanto es el más ampliamente utilizado; sin embargo, todas estas normas definen algún o algunos parámetros adicionales (Ver Tabla 11).

	1	2	3	4	5	6	7	8	
parámetro / Países	División media aritmética del perfil	Máxima altura del perfil	Diez puntos de altura de las irregularidades	Raíz cuadrada media de la desviación del perfil	Máxima altura del pico del perfil	Proporción del comportamiento de la longitud del perfil	Espaciamiento medio de los picos locales del perfil	Espaciamiento medio de las irregularidades del perfil	Norma
Japón	R_a	R_{max}	R_z						JIS B 0601-1982
U.S.A.	R_a*								ANSI B 46.1-1985
Reino Unido	R_a		R_z						BS 1134-1972
Italia	R_a	R_{max} (R_{tm})	R_z	RMS		t	S_m		UNI 3963 Part 2-1978
India	R_a	R_{max}	R_z	R_q					IS 3073-1967
Australia	R_a								AS 1965-1977
Noruega	R_a								NEN 3631-1977, 3632-1974
Canadá	R_a*								CSA B 95-1962
Suecia	R_a*	R_{max}	R_z			t_p	S		SMS 671-1975, 673-1975
Rusia	R_a	R_{max}	R_z			t_p	S	S_m	GOST 2789-73-1974
Alemania	R_a	R_t (R_{max})	R_z	R_p		t_p	A_r		DIN 4762 Blatt 1-1960, 4767-1970, 4768 Teil 1-1978, 4768 Blatt 1-1978
Francia	R_a	R_t (R_{max})		R_p		$(T_a)_c$	A_H		NF 05-15-1972
Finlandia	R_a	R_{max}	R_z						SFS 2038-1969
Polonia	R_a	R_{max}	R_z			N_L			PN-73/M-04250-1974, /M-04251-1974
ISO	R_a	R_y	R_z			t_p	S	S_m	R 468-1966

Tabla 11 Parámetros de rugosidad utilizados en diferentes países

5.2.2 Definición de Rz.

El promedio de las alturas de pico a valle se denomina Rz, y las normas JIS e ISO lo definen como la diferencia entre el promedio de las alturas de los cinco picos más altos y la altura promedio de los cinco valles más profundos. Los picos y valles se miden en la dirección de la amplificación vertical, dentro de la longitud de evaluación (lm), desde una línea paralela a la línea media y que no intercepta al perfil, como se muestra en la figura 5.9, y queda expresada con la siguiente formula:

$$Rz\ (JIS\text{-}ISO) = \frac{(P1 + P2 + P3 + P4 + P5) - (V1 + V2 + V3 + V4 + V5)}{5} \qquad (35)$$

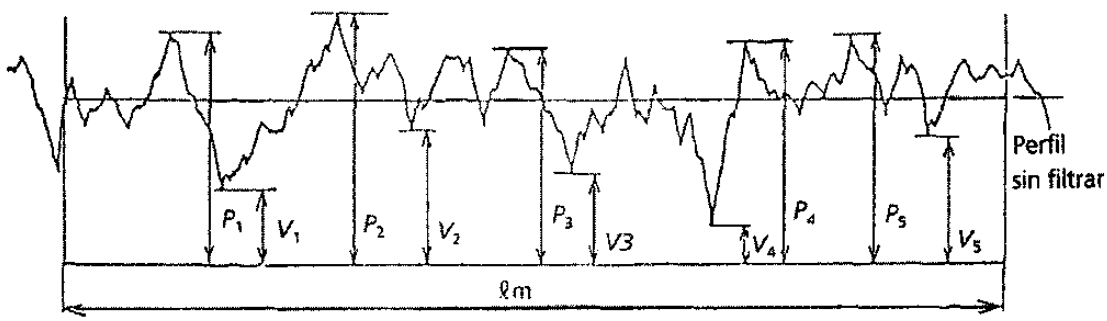


Figura 5.9 Picos y valles medidos de acuerdo a las normas JIS e ISO

El promedio de alturas de pico a valle denominado Rz, la norma DIN lo define como el valor promedio de la diferencia (Zi) entre el pico mas alto y el valle mas bajo de cinco sucesivas longitudes de muestreo (le) dentro de la longitud de evaluación (lm), medida en la dirección de la línea media, mostrado en la figura 5.10 y queda expresada con la siguiente formula:

$$Rz\ (DIN) = \frac{Z1 + Z2 + Z3 + Z4 + Z5}{5} \qquad (36)$$

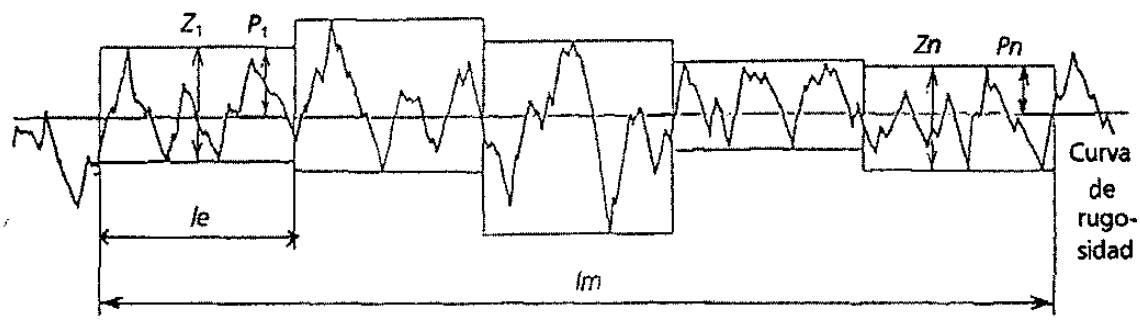


Figura 5.10 Muestra la manera de calcular Rz de acuerdo con la norma DIN

5.2.3 Definición de Ry.

La máxima altura del perfil, denominado Ry, las normas JIS/ISO la definen como la máxima distancia entre las líneas de perfil de picos y valles. La máxima altura del perfil, medida en la dirección de la amplificación vertical dentro de la longitud de evaluación (lm) figura 5.11, la norma DIN la define como el máximo valor de Zi, determinado para Rz DIN. En otros países Ry se denomina Rmax; este método de evaluación ocupa el segundo lugar en cuanto a su adopción por diferentes países industriales, mientras que el tercer lugar lo ocupa Rz.

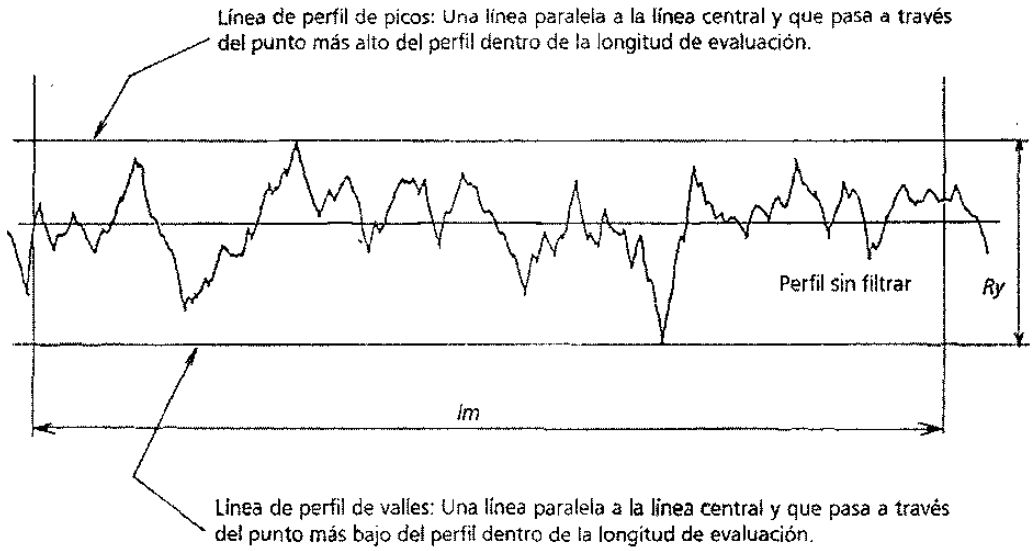


Figura 5.11 Muestra la manera de calcular Ry

5.2.4 Símbolos para la dirección de marcado.

La tabla 12 muestra los símbolos de la norma ISO que se utilizan para indicar en los dibujos las direcciones de las marcas producidas por el proceso de maquinado.

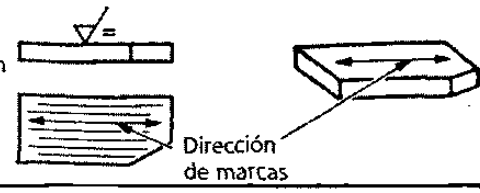
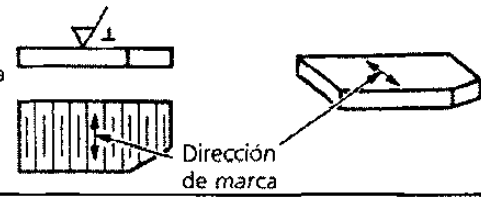
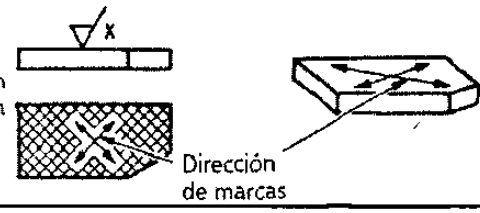
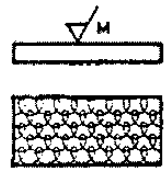
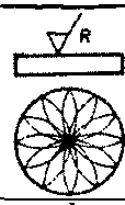
Símbolo	Interpretación
=	Paralelo al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
⊥	Perpendicular al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
X	Cruzado en dos direcciones inclinadas con relación al plano de proyección de la vista en la cual se usa el símbolo. 
M	Multidireccional 
C	Aproximadamente circular en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo.
R	Aproximadamente radial en relación con el centro de la superficie en la cual se aplica el símbolo. 

Tabla 12 Muestra las direcciones de marca producidas por el proceso de maquinado

Las tablas 13, 14 y 15 muestran, sinópticamente, el método de indicar el acabado superficial con dibujos tomados de la misma norma.

Símbolo	Significado
	Símbolo básico. Puede usarse sólo cuando su significado se aplica en una nota.
	Una superficie maquinada sin indicación de cualquier otro detalle.
	Una superficie en la cual está prohibida la eliminación de material. Este símbolo también puede utilizarse en un dibujo relacionado con un proceso de producción para indicar que una superficie quedará tal como quedó después de un proceso de manufactura precedente, sin importar si tal estado se logró eliminando material o de ota forma.

Tabla 13 Símbolos de rugosidad sin indicación adicional

Símbolo			Significado
La eliminación de material por maquinado es			
Opcional	Obligatoria	Prohibida	
3,2 o N 8	3,2 o N 8	3,2 o N 8	Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial *Ra* de 3.2 µm
6,3 1,6 o N 9 N 7	6,3 1,6 o N 9 N 7	6,3 1,6 o N 9 N 7	Una superficie con valor máximo de rugosidad superficial *Ra* de 63 µm y un mínimo de 1.6 µm.

Tabla 14 Símbolos de rugosidad con indicación del principal criterio de rugosidad Ra

Símbolo	Significado
Fresado	Método de producción: fresado
2.5	Longitud de muestreo: 2.5 mm
	Dirección de marcado: perpendicular al plano de proyección de la vista.
2	Tolerancia de maquinado: 2 mm
(R_t = 0.4)	Indicación (en paréntesis) de un criterio de rugosidad diferente de Ra; por ejemplo, Rt = 0.4 µm

Tabla 15 Símbolos de rugosidad con indicación adicional

5.3 Recomendaciones prácticas para medir la rugosidad de una superficie.

De acuerdo con la norma ISO, las especificaciones del acabado superficial deberán colocarse en relación con el símbolo básico como se muestra a continuación en la figura 5.12.

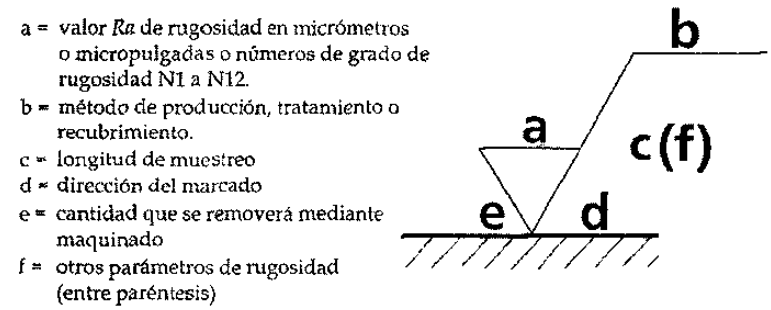


Figura 5.12 Muestra el símbolo básico de rugosidad con las definiciones de cada parámetro

Sin embargo, es muy común encontrar solo una indicación como la siguiente mostrada en la figura 5.13.

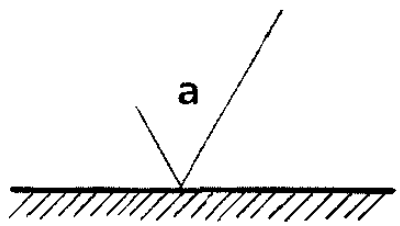


Figura 5.13 Símbolo de rugosidad mas comúnmente utilizado

Por lo que a continuación se dan algunas recomendaciones prácticas como proceder en estos casos.

1. Si no se menciona ningún parámetro en especial se entenderá que la medición será con el parámetro Ra.
2. El valor numérico mostrado indicara el valor máximo admisible y cualquier valor menor será aceptable.
3. La longitud de muestreo (o valor de cut-off) que deberá utilizarse, si no se especifica ninguna, será 0.8 mm.
4. La longitud de evaluación deberá fijarse igual a 5 veces la longitud de muestreo.

5. La medición se hará perpendicular a las marcas del maquinado o, si no hay una dirección preferencial, será necesario realizar tres mediciones en posiciones angulares diferentes y reportar el mayor valor.
6. Los parámetros más utilizados son Ra, Rz y Ry, por lo que pueden encontrarse en cualquier rugosímetro; sin embargo, los dos últimos están definidos de forma diferente en las normas DIN y en las normas JIS e ISO, por tanto, habrá de seleccionarse de acuerdo con los valores que se requieran.
7. Cuando este indicado un parámetro de rugosidad diferente a los anteriores, debe contarse con un rugosímetro capaz de medirlo. No existen factores para realizar conversiones de un parámetro a otro.

El principal criterio de rugosidad (Ra), puede indicarse con el correspondiente número de grado de rugosidad (ver la tabla 16), para evitar la mala interpretación de valor numéricos, los cuales pueden denotarse con diferentes unidades (micrómetros o micropulgadas).

Valores de rugosidad *Ra*		Números de grados de rugosidad
µm	µpulg	
50	2000	N 12
25	1000	N 11
12.5	500	N 10
6.3	250	N 9
3.2	125	N 8
1.6	63	N 7
0.8	32	N 6
0.4	16	N 5
0.2	8	N 4
0.1	4	N 3
0.05	2	N 2
0.025	1	N 1

Tabla 16 Grado de rugosidad contra valor numérico