



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Estudio de estrategias de
corte en el proceso de fresado

T E S I S

Que para obtener el título de:
Ingeniero Mecánico

Presenta:

Roberto Carlos Vega Morón



Director de Tesis:

Dr. José Javier Cervantes Cabello

Ciudad Unversitaria, México, D.F., 2012

A mi mamá, Gloria: gracias por todo.

Agradecimientos

A mi mamá, por haberme dado la vida. Por haber decidido enfrentar la empresa –que no era sencilla- de tenerme y criarme por tu cuenta. Requería mucha determinación, coraje, valor y cariño; nada de eso faltó.

Gracias por haberme dado cariño, tiempo, enseñanzas, principios y valores que crearon, en parte, la persona que soy hoy en día.

Gracias por haberme apoyado de manera incondicional siempre. Esto es una mínima retribución a todo lo que me has dado.

A Esperanza, por haber tenido la paciencia y dedicación de criarme.

A Emma, por haber estado siempre ahí, por haberme apoyado y ayudado a formarme.

A Luis, Rodrigo y Gustavo, por haber compartido tantas cosas, por transmitir gustos y aficiones, y por haber sido, en parte, modelos a seguir.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme formado como una persona consciente de su entorno. A la Facultad de Ingeniería, por haberme dado los elementos para mi formación como profesionista. A mis amigos en la Facultad, por haber compartido tantas horas y tantos momentos, dentro y fuera de las aulas; sin su compañía, esta travesía hubiera sido más laboriosa.

Índice

Lista de Tablas	I
Lista de Figuras	II
Introducción	VII
Capítulo 1. El proceso de fresado	1
1.1 Clasificación de las máquinas fresadoras	2
1.2 Tipos de cortadores para fresadoras	10
1.2.1 Dientes de fresas	14
1.3 Parámetros del fresado	16
1.4 Operaciones de fresado	19
1.4.1 Fresado horizontal	20
1.4.2 Fresado convencional y fresado concurrente	21
1.4.3 Fresado de refrentado	22
1.4.4 Fresado frontal o de acabado	26
1.4.5 Otros tipos de fresado y sus cortadores	26
1.5 Portaherramientas	27
Capítulo 2. Técnicas de optimización de mecanizado	31
2.1 Modelado de la relación de parámetros en el proceso de maquinado	34
2.1.1 Técnica de regresión estadística	34
2.1.2 Modelado en base a Redes Neuronales Artificiales	35
2.1.3 Modelado basado en Conjuntos Difusos	36
2.2 Técnicas de optimización	36
2.2.1 Técnicas de optimización convencionales	38
2.2.1.1 Método de Taguchi	38
2.2.1.2 Metodología de superficie de respuesta	39
2.2.1.3 Técnicas de búsqueda iterativa matemática	40
2.2.2 Técnicas no convencionales	42

2.2.2.1 Algoritmo genético	42
2.2.2.2 Búsqueda Tabú	43
2.2.2.3 Recocido simulado	44
2.3 Diseño de experimentos y método de Taguchi	45
2.3.1 DOE usando arreglos ortogonales	48
2.3.2 Propiedades de los arreglos ortogonales	52
2.3.3 Arreglos ortogonales usuales y sus propiedades especiales	53
Capítulo 3. Desarrollo Experimental	55
3.1 Selección de las variables del proceso	58
3.2 Selección de las condiciones de corte para el maquinado	59
3.3 Descripción de los experimentos	64
3.4 Simulación en Mastercam	66
3.5 Maquinado de piezas	72
3.6 Medida de rugosidad superficial	74
Capítulo 4. Resultados	79
4.1 Análisis S/N	81
4.2 Análisis ANOVA	99
Capítulo 5. Análisis y conclusiones	111
5.1 Análisis de resultados	111
5.2 Conclusiones	113
Bibliografía	115

Lista de tablas

Tabla 1.1 Guía general para resolver problemas en operaciones de fresado

Tabla 1.2 Recomendaciones generales para operaciones de fresado.

Tabla 2.1 Descripción de experimentos usando notaciones de nivel.

Tabla 2.2 Arreglo ortogonal L-4 (2^3).

Tabla 2.3 Arreglo L-9 (3^4).

Tabla 2.4 Arreglo ortogonal L-8 (2^7).

Tabla 2.5 Columnas balanceadas.

Tabla 2.6 Arreglos ortogonales más usados para diseñar experimentos.

Tabla 2.7 Arreglo Ortogonal con 3 factores de dos niveles.

Tabla 3.1 Arreglo L-9 (3^4).

Tabla 3.2 Propiedades de aleación de aluminio 1100.

Tabla 3.3 Parámetros recomendados para aluminio 1100.

Tabla 3.4 Factores y niveles para el arreglo ortogonal.

Tabla 3.5 Arreglo ortogonal L-9 (3^4) con factores y niveles.

Tabla 3.6 Rugosidad superficial de las placas maquinadas.

Tabla 4.1 Resultados de S/N para la estrategia de corte en espiral.

Tabla 4.2 Resultados de S/N para la estrategia de corte en zigzag.

Tabla 4.3 Resultados de S/N para la estrategia de corte en un sentido.

Tabla 4.4 Tabla ANOVA de la estrategia en espiral.

Tabla 4.5 Tabla ANOVA de la estrategia en zigzag.

Tabla 4.6 Tabla ANOVA de la estrategia en un sentido.

Tabla 4.7 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en espiral.

Tabla 4.8 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en zigzag.

Tabla 4.9 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en un sentido.

Tabla 4.10 Tiempos de maquinado.

Lista de figuras

Figura 1.1 Fresa de Eli Whitney.

Figura 1.2 Fresa en sentido contrario al movimiento de la pieza de trabajo.

Figura 1.3 Fresadora manual.

Figura 1.4 Fresadora simple.

Figura 1.5 Fresadora universal.

Figura 1.6 Fresadora vertical.

Figura 1.7 Fresadora del tipo cepillo.

Figura 1.8 Fresadora con tres cabezales.

Figura 1.9 Centro de maquinado.

Figura 1.10 Fresadora de mesa giratoria.

Figura 1.11 Montaje de la fresadora planetaria.

Figura 1.12 Fresadora perfiladora.

Figura 1.13 Fresadora copiadora.

Figura 1.14 Fresa ordinaria.

Figura 1.15 Fresa de corte lateral.

Figura 1.16 Fresa de ranurar.

Figura 1.17 Fresa angular.

Figura 1.18 Fresa de forma.

Figura 1.19 Fresa cilíndrica frontal.

Figura 1.20 Fresas para ranura en T.

Figura 1.21 Fresa con dientes postizos.

Figura 1.22 Dispositivo para montar fresa.

Figura 1.23 Nomenclatura del cortador y sus ángulos.

Figura 1.24 Ilustración de la distancia de acercamiento del fresado.

Figura 1.25 Algunos de los tipos básicos de fresas y operaciones de fresado.

Figura 1.26 Pieza que se puede producir en una fresadora con controles computarizados.

Figura 1.27 (a) Fresado convencional y fresado concurrente. (b) Fresado plano (c) l_c de la fresa para obtener toda la profundidad de corte.

Figura 1.28 Operación de fresado de refrentado mostrando (a) la acción de un inserto, (b) fresado concurrente, (c) fresado convencional, (d) dimensiones en el fresado de refrentado.

Figura 1.29 Fresa de carear con insertos indexables.

Figura 1.30 Esquema del efecto de la forma del inserto sobre las marcas de avance en una superficie careada con fresado: (a) pequeño diámetro de esquina, (b) esquina plana del inserto y (c) limpiador, formado por un radio pequeño seguido de uno grande, que deja marcas de avance más lisas, (d) marcas de avance debidas a formas diversas.

Figura 1.29 Terminología para una fresa de refrentar o carear.

Figura 1.30 Efecto del ángulo de avance sobre el espesor no deformado de viruta en el fresado de careado.

Figura 1.31 (a) Posición relativa de la fresa y el inserto al entrar por primera vez a la pieza en el careado; (b) posiciones del inserto al terminar el corte y (c) ejemplos de ángulos de salida del inserto.

Figura 1.32 Fresas para (a) fresado compuesto, (b) fresado de forma, (c) ranurado y (d) tronzado.

Figura 1.35 (a) Corte de una ranura en T con fresa. (b) Una fresa hueca.

Figura 1.33 Montaje de una fresa en un eje de una fresadora horizontal.

Figura 1.34 Marcas superficiales y defectos en aristas en operaciones de fresado de refrentado.

Figura 2.1 Técnicas de optimización y modelado.

Figura 2.2 Experimentos posibles con dos factores de dos niveles.

Figura 3.1 Diagrama del proceso

Figura 3.2 Mapa del proceso

Figura 3.3 Estrategia de corte en espiral.

Figura 3.4 Estrategia de corte en zigzag.

Figura 3.5 Estrategia de corte en un sentido.

Figura 3.6 *Sketch* de la cavidad.

Figura 3.7 Configuración de la pestaña *Stock Set Up*.

Figura 3.8 Selección de la cadena que es la geometría de la cavidad.

Figura 3.9 Características de la herramienta.

Figura 3.10 Configuración en el submenú de *tool*.

Figura 3.11 Configuración del submenú *Roughing*.

Figura 3.12 Configuración del submenú *Depth Cuts*.

Figura 3.13 Configuración del submenú *Linking parameters*.

Figura 3.14 Opción *verify* ejecutándose.

Figura 3.15 Opción *Backplot* ejecutándose.

Figura 3.16 Mill Master B-10 V Shizuoka.

Figura 3.17 Reloj palpador.

Figura 3.18 Proceso de maquinado.

Figura 3.19 Proceso de maquinado.

Figura 3.20 Cavidad maquinada con estrategia zigzag.

Figura 3.21 Cavidad maquinada con estrategia espiral.

Figura 3.22 Cavidad maquinada con estrategia un sentido.

Figura 3.23 Coordenadas utilizadas para medir rugosidad R_a .

Figura 3.24 Alturas Z_i para rugosidad R_z y $R_{m\acute{a}x}$.

Figura 3.25 Equipo Mitutoyo Surfptest 402.

Figura 3.26 Equipo Mitutoyo Surfptest Analyzer.

Figura 3.27 Medida de rugosidad superficial.

Figura 4.1 Desviación cuadrada promedio para cualquier tipo de distribución.

Figura 4.2 S/N velocidad de corte para estrategia en espiral.

Figura 4.3 S/N avance para estrategia en espiral.

Figura 4.4 S/N profundidad de corte para estrategia en espiral.

Figura 4.5 S/N diámetro útil para estrategia en espiral.

Figura 4.6 S/N velocidad de corte para estrategia en zigzag.

Figura 4.7 S/N avance para estrategia en zigzag.

Figura 4.8 S/N profundidad de corte para estrategia en zigzag.

Figura 4.9 S/N diámetro útil para estrategia en zigzag.

Figura 4.10 S/N velocidad de corte para estrategia en un sentido.

Figura 4.11 S/N avance para estrategia en un sentido.

Figura 4.12 S/N profundidad de corte para estrategia en un sentido.

Figura 4.13 S/N diámetro útil para estrategia en un sentido.

Figura 4.14 Rugosidad vs velocidad de corte estrategia en espiral.

Figura 4.15 Rugosidad vs avance estrategia en espiral.

Figura 4.16 Rugosidad vs profundidad de corte estrategia en espiral.

Figura 4.17 Rugosidad vs diámetro útil estrategia en espiral.

Figura 4.18 Rugosidad vs velocidad de corte estrategia en zigzag.

Figura 4.19 Rugosidad vs avance estrategia en zigzag.

Figura 4.20 Rugosidad vs profundidad de corte estrategia en zigzag.

Figura 4.21 Rugosidad vs diámetro útil estrategia en zigzag.

Figura 4.22 Rugosidad vs velocidad de corte en un sentido.

Figura 4.23 Rugosidad vs avance en un sentido.

Figura 4.24 Rugosidad vs profundidad de corte en un sentido.

Figura 4.25 Rugosidad vs diámetro útil en un sentido.

Figura 4.26 Comparación entre las estrategias de corte con la de velocidad de corte

Figura 4.27 Comparación entre las estrategias de corte con la profundidad de corte

Figura 4.28 Comparación entre las estrategias de corte con el avance

Figura 4.29 Comparación entre las estrategias de corte con el diámetro útil

Figura 4.30 Influencia total y de los factores.

Figura 4.31 Influencia de un factor como porcentaje del total.

Figura 4.32 Cálculo de la suma de cuadrados total.

Introducción

Los procesos de maquinado son fundamentales en la industria, pues gracias a éstos se pueden obtener piezas con acabados finales. Uno de estos procesos es el fresado, a través de él se pueden conseguir piezas de diferentes geometrías.

En el fresado, se llama estrategia de corte o trayectoria de herramienta, a la forma en cómo se mueve la herramienta para remover el material en la pieza de trabajo. Existen diferentes estrategias de corte, dependiendo de cuál se elija y de ciertos parámetros de corte, se tendrán diferentes resultados en la pieza final.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar tres diferentes estrategias de corte para evaluar el desempeño de cada una de ellas, y con base en los resultados poder determinar cuál es la más recomendable.

De manera particular, se busca obtener información acerca de tiempos de maquinado y rugosidades superficiales que se obtienen con las estrategias de corte en espiral, zigzag y un sentido, en el caso de estudio propuesto.

La importancia de esta investigación radica en que el tipo de estrategia de corte elegida impacta directamente tanto en la calidad de la pieza como en el costo de producción; ya que dependiendo de cuál se elija, varía el tiempo de maquinado, acabado superficial, desgaste de la herramienta, calidad, etcétera.

El alcance de esta investigación es la evaluación de un caso de estudio, éste corresponde a los maquinados de una pieza –con geometría concebida para fines de investigación- y la posterior toma de rugosidad superficial. Para el diseño del experimento se emplea uno de los métodos de optimización de procesos de maquinado que se reportan en la literatura: Método de Taguchi. En este trabajo no se evalúa el desempeño de las diferentes estrategias de corte en un caso aplicado a la industria, pero los resultados pueden ser extrapolados.

El presente trabajo está compuesto de cinco capítulos que a continuación se resumen brevemente:

En el primer capítulo se describe el proceso de fresado. Se presentan diferentes tipos de máquinas, herramientas y formas de llevar a cabo el proceso.

En el segundo capítulo se muestran diferentes maneras de optimizar el maquinado a través de un breve vistazo al estado del arte en ese tema. Sólo se profundiza en el método de Taguchi, que es la técnica empleada.

En el tercer capítulo se describe el desarrollo experimental: tipo de arreglo ortogonal empleado, parámetros de corte y sus niveles, simulado y maquinado de las piezas, y finalmente la medida de rugosidad superficial de las piezas.

En el cuarto capítulo se hacen dos análisis con los resultados de rugosidad obtenidos. El primero es el análisis de señal-ruido con el que se obtienen los niveles óptimos de los parámetros. El segundo es el análisis de varianza, con el que se obtiene el porcentaje de influencia de cada parámetro a la variación total de los resultados.

En el quinto capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos y se sacan conclusiones respecto al caso de estudio.

Capítulo I. El proceso de fresado

La máquina fresadora fue inventada por Eli Whitney en el año de 1818 y se muestra en la Figura 1.1. 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.

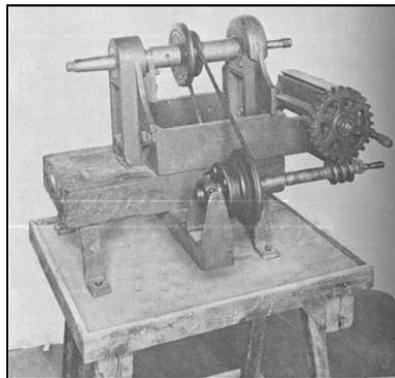


Figura 1.1 Fresa de Eli Whitney.¹

En la máquina fresadora se desprende metal cuando la pieza avanza contra la herramienta cortante como se muestra en la Figura 1.2; exceptuando el movimiento de rotación, el cortador no tiene otro movimiento. El cortador de la máquina fresadora (llamado fresa) tiene una serie de aristas cortantes sobre la circunferencia y cada una de ellas actúa como un cortador individual durante el ciclo de rotación. La pieza se monta sobre una mesa que controla el avance contra el cortador. En la mayoría de las máquinas la mesa tiene tres posibles movimientos, longitudinales, transversales, y verticales, pero en algunas, la mesa puede tener un movimiento de giro o rotación.

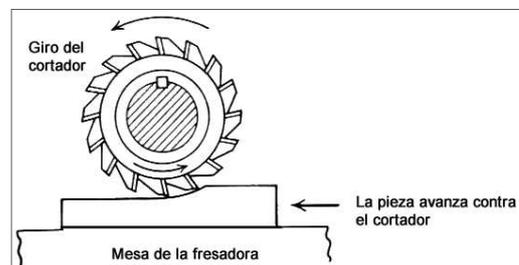


Figura 1.2 Fresa en sentido contrario al movimiento de la pieza de trabajo.¹

La fresadora es una de las máquinas herramientas más versátiles, se pueden hacer superficies planas o perfiles determinados pueden ser maquinados con acabado y precisión excelente. Los ángulos, ranuras, dientes de engrane o cortes interiores pueden hacerse empleando cortadores diferentes.

1.1 Clasificación de las máquinas fresadoras

Las máquinas fresadoras son hechas en una gran variedad de tipos y medidas. Pueden ser accionadas por banda y cono de poleas o por motor individual; el avance de la pieza puede ser manual, por medios mecánicos o por un sistema hidráulico. Hay además una variedad de movimientos posibles para la mesa; la clasificación usual es de acuerdo con el diseño general, pero aun en esta clasificación hay algunos sobrepuestos. De acuerdo al diseño los distintos tipos son:

- A. Tipo de columna y ménsula
 - 1.- Fresadora manual
 - 2.- Fresadora simple
 - 3.- Fresadora universal
 - 4.- Fresadora vertical
- B. Fresadora tipo cepillo
- C. Fresadora de bancada fija
 - 1.- Fresadora con un cabezal
 - 2.- Fresadora con dos cabezales
 - 3.- Fresadora con tres cabezales
- D. Centros de maquinado
- E. Tipos especiales
 - 1.- Fresadora con mesa giratoria
 - 2.- Fresadora planetaria
 - 3.- Máquina perfiladora
 - 4.- Fresadora copiadora

Fresadora manual. El tipo más simple de máquina fresadora es la operada manualmente (Figura 1.3); puede ser del tipo columna y ménsula o de mesa montada en bancada fija. Las máquinas operadas a mano son usadas principalmente en trabajos de producción con operaciones simples. Estas máquinas tienen un eje horizontal donde se monta el cortador y la mesa de trabajo provista con tres movimientos; la pieza avanza contra el cortador giratorio, por movimiento manual de una leva o por tornillo accionado por volante.



Figura 1.3 Fresadora manual.²

Fresadora simple. La fresadora simple es similar a la fresadora manual, excepto que es de construcción más robusta y está provista de un mecanismo de avance automático para controlar los movimientos de la mesa. Las fresadoras simples del tipo de columna y ménsula tienen tres movimientos: longitudinal, vertical y transversal. Las de tipo de bancada fija la mesa tiene solamente movimiento longitudinal, pero el eje que soporta el cortador tiene ajuste vertical y transversal.

La Figura 1.4 muestra una fresadora simple con columna y ménsula. Aunque es una máquina de propósitos generales, también se usa para trabajos de producción. Otros modelos disponen de un cabezal fresador universal o vertical; la máquina emplea topes para controlar los desplazamientos de la mesa que también puede estar provista de un ciclo automático, por medio de volantes se puede controlar el movimiento longitudinalmente mientras el otro se controla a mano; los cortadores se montan en un eje horizontal que se encuentra rígido por el soporte.



Figura 1.4 Fresadora Simple.³

Fresadora universal. La fresadora universal (Figura 1.5) es esencialmente una máquina para la manufactura de herramientas construida para piezas muy precisas. En apariencia es similar al tipo de fresadora simple, pero difiere en que la mesa de trabajos está provista de un cuarto movimiento que le permite girar horizontalmente y está equipada con un divisor o cabezal divisor localizado en el extremo de la mesa. La característica de giro en las máquinas universales permite el corte de helicoidales como las encontradas en las brocas, fresa, levas y algunos engranes.

Las fresadoras universales pueden también estar equipadas con un aditamento para fresado vertical y un dispositivo de mesa giratoria, prensa y cabezal mortajador, así como otros accesorios todos los cuales le añaden utilidad como máquina para hacer herramientas.

La disposición de ciclos automáticos puede ser suministrada a las máquinas universales, éstos controlan automáticamente los desplazamientos de la mesa desde la puesta en marcha hasta la parada.



Figura 1.5 Fresadora universal.⁴

Fresadora vertical. Una máquina vertical típica se muestra en la Figura 1.6 y se le llama así por la posición vertical del eje de corte. Los movimientos de la mesa son los mismos que los de la fresadora simple. Ordinariamente, no se le da a la herramienta otro movimiento que no sea el usual de rotación. Sin embargo, el cabezal del eje puede girar, lo cual permite colocar al eje que se encuentra en un plano vertical en cualquier posición desde la vertical hasta la horizontal. En esta máquina el eje tiene un pequeño desplazamiento axial para facilitar el fresado escalonado. Algunas fresadoras verticales están provistas de aditamentos giratorios o mesas de trabajo

giratorias para permitir el fresado de ranuras circulares o el fresado continuo de piezas en trabajos de baja producción. Todos los cortadores son del tipo cilíndricos frontales.



Figura 1.6 Fresadora vertical.³

Fresadora del tipo de cepillo. Este tipo de fresadora recibe su nombre debido a la semejanza que tiene con un cepillo (Figura 1.7). La pieza a trabajar se monta sobre una mesa larga que tiene solamente movimiento longitudinal, y avanza a la velocidad apropiada contra el cortador giratorio. El movimiento de avance variable de la mesa y el giro del cortador son las principales características que distinguen esta máquina de un cepillo. El eje del cortador tiene los movimientos vertical y transversal. Estas máquinas han sido diseñadas para el fresado de piezas largas que requieren gran eliminación de material así como para el duplicado preciso de contornos y perfiles.



Figura 1.7 Fresadora del tipo cepillo.³

Fresadora del tipo de bancada fija. Las máquinas de este tipo son de producción y de construcción robusta, la bancada es una pieza fundida, rígida y de gran peso que soporta la mesa de trabajo la cual tiene solamente movimiento longitudinal; el ajuste vertical es suministrado por el cabezal del eje y el transversal está interconstruido en el eje. Las denominaciones simplex, dúplex o triplex indican que la máquina esté equipada con uno, dos y tres cabezales (Figura 1.8).



Figura 1.8 Fresadora con tres cabezales.³

Centros de maquinado. Los centros de maquinado son máquinas de control numérico diseñadas para producción de lotes pequeños y medianos (Figura 1.9). El termino centro de maquinado fue desconocido antes del advenimiento del control numérico. Un centro de maquinado puede referirse a una o más máquinas de Control Numérico que tienen capacidad de maquinado de múltiples propósitos. Es incorrecto asumir que estas máquinas pueden hacer solamente operaciones de fresado, pues se pueden hacer operaciones de: fresado, taladrado, mandrinado, rimado y machueleado pudiéndose llevar a cabo con la ayuda de accesorios. Dependiendo del tipo de máquina, puede hacer la parada y puesta en marcha de la máquina de cambio y selección de las herramientas, el contorneado en dos o tres direcciones empleando interpolación lineal y otro tipo de interpolación técnica, avance en uno o múltiplo de dos o tres ejes (2.4 a 2400 [mm/min]) posicionamiento en cualquier eje con desplazamiento rápido alrededor de 10 [m/min], marcha o parada del eje a una velocidad y sentido de rotación programada, colocación de la mesa a la posición determinada, paro y circulación del refrigerante. Aunque estas máquinas son versátiles, las diferentes características son opcionales dependiendo del costo.

La contribución del control numérico en la economía depende de las funciones auxiliares que lo apoyen, para maximizar toda economía práctica de esta versátil técnica de manufactura, la pieza debe quedar hasta donde sea posible completamente maquinada en un solo montaje sin transferirla a otras diferentes máquinas.

Un cambiador automático de herramientas hace el cambio de cortador por cortador en cuatro o más segundos. Un almacén de herramientas puede tener desde 8 hasta 90 o más herramientas almacenadas permanentemente o semipermanentemente según el trabajo lo requiera. Para la precisión deseada en la profundidad, es posible controlarla al hacer tocar por medio de un volante la punta de la herramienta en la superficie de la pieza; esta información es grabada sin la necesidad de la unidad de control de la máquina. Los centros de maquinado de control numérico tienen un conmutador capaz de recibir la programación de pulgadas o en sistema métrico.

Los centros de maquinado son capaces de manejar una amplia variedad de tamaños y formas de partes de manera eficiente, económica y repetitiva; tienen alta precisión dimensional y tolerancias del orden de ± 0.0025 [mm] (0.001 [in]). Son versátiles y tienen la capacidad de cambiar con rapidez de un tipo de producto a otro. Debido a la productividad de los centros de maquinado, se generan grandes cantidades de viruta que deben recolectarse y desecharse de manera adecuada.

Existen centros de maquinado con una amplia variedad de tamaños y características. Las capacidades comunes llegan a hasta 75 kW (100 hp). Por lo general, las velocidades máximas de husillo van de 4000 a 8000 RPM y algunas llegan a 75000 RPM para aplicaciones especiales, utilizando cortadores de diámetro pequeño. Algunas máquinas tienen capacidad de soportar piezas de trabajo que pesan hasta 7000 kg.



Figura 1.9 Centro de maquinado.³

Fresadora de mesa rotatoria. Las máquinas de mesa rotatoria (Figura 1.10), como la que se muestra en la Figura 1.10 son adaptaciones de la máquina fresadora vertical para uso especializado. Otras máquinas pueden utilizar dos ejes cada una equipada con un cortador. La operación es continua y queda tiempo suficiente para que el operador cargue o descargue la máquina durante el fresado.



Figura 1.10 Fresadora de mesa giratoria.⁵

Fresadora planetaria. La fresadora planetaria es usada para el fresado interior o exterior de roscas cortas. La pieza es estacionaria y todos los movimientos necesarios para el corte son hechos por el cortador. Al iniciar un trabajo, el cortador se encuentra en posición central o neutra. Primero se alimenta radialmente hasta la profundidad correcta, aplicándose luego un movimiento planetario ya sea adentro o alrededor del material. La relación entre la pieza y el cortador se muestra en la Figura 1.11. Las aplicaciones típicas de esta máquina incluyen el fresado de roscas internas y externas en toda clase de superficies cónicas, superficies de rozamiento, barrenos en diferenciales, casquillos y puntas para bomba.

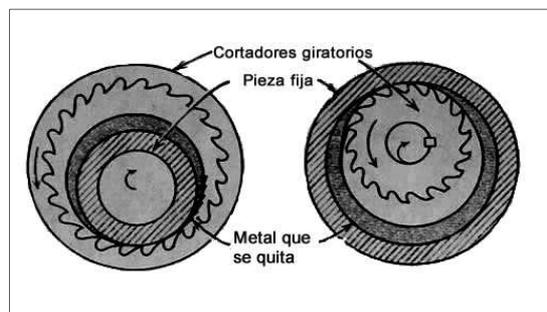


Figura 1.11 Montaje de la fresadora planetaria.¹

Máquinas perfiladoras. Una gran variedad de máquinas como duplicadoras, pantógrafos y perfiladoras han sido desarrolladas para el corte de matrices y moldes, grabado y perfilado. La mayoría de ellas son una adaptación de la fresadora vertical no obstante que algunas trabajan con el eje en posición horizontal. Tal vez la máquina perfiladora manual sea la más simple, teniendo un cortador giratorio cuyo movimiento es controlado por el movimiento manual de la mesa (Figura 1.12). Estos movimientos son guiados moviendo la mesa de manera que el perno guía esté en contacto con alguna forma de plantilla.



Figura 1.12 Fresadora perfiladora.⁶

Máquinas duplicadoras. La producción de matrices formadoras grandes para salpicaderas, tableros, toldos, portezuelas para automóviles, son ejemplos del uso de las máquinas (Figura 1.13).



Figura 1.13 Fresadora copiadora³

1.2 Tipos de cortadores para fresadoras

La fresadora es versátil por la gran variedad de cortadores que existen; estos cortadores se clasifican de acuerdo a su forma, aunque en algunos casos su clasificación depende de la forma como son montados, del material usado en los dientes, o del método empleado para afilar éstos. Existen tres diseños generales de fresas:

1.- Fresas para eje. Estas fresas tienen un agujero en el centro para montarse en un eje.

2.- Fresas con zanco. Estas fresas tienen un zanco recto o cónico integrado al cuerpo del cortador. Cuando se usan estos cortadores van montados en una boquilla del eje o en un adaptador para el mismo.

3.- Fresas para refrentar. Estas fresas son atornilladas o montadas en el extremo de ejes pequeños y son generalmente usadas para el fresado de superficies planas.

La clasificación de acuerdo a los materiales, siguen los mismos lineamientos que para otros tipos de herramientas cortantes. Las fresas son hechas de acero de alto carbono, de aceros de alta velocidad, con insertos de carburo o de ciertas aleaciones fundidas no ferrosas. Las fresas de acero de alto carbono tienen un uso limitado dado que se desafilan rápidamente si se emplean altas velocidades de corte y avance. La mayoría de las fresas de uso general son hechas de acero alta velocidad, mantienen sus aristas de corte afiladas a temperaturas de 500 a 600 [°C]. En consecuencia, pueden usarse a velocidades de corte de 2 a 2 ½ veces las recomendadas para fresas de acero al carbono. Los metales y aleaciones fundidas no ferrosas como la Stelita, Cobalto o Rexalloy y fresas con insertos de carburo, tienen gran resistencia al calor y se adaptan especialmente para cortes profundos y altas velocidades de corte. Estos materiales se usan como insertos, en el cuerpo del cortador o van soldados directamente en la punta del diente. Las velocidades de corte para herramienta de carburo y aleaciones fundidas no ferrosas varían de dos a cinco veces las recomendadas para las de acero alta velocidad.

Los dientes en las fresas están hechos en dos estilos generales de acuerdo al método empleado en su afilado. Los *cortadores de perfiles* se afilan esmerilando una pequeña área a través del filo cortante del diente, esto suministra también el desahogo necesario en la parte posterior del filo del diente. Los *cortadores formados* son hechos con el desahogo (parte posterior del filo) y con el mismo contorno del filo. Para afilar estos cortadores la cara del diente se esmerila de manera de no destruir el contorno del diente.

Los cortadores más usados se clasifican en primer lugar de acuerdo a su forma general o al tipo de trabajo que van a efectuar.

1.- Fresa ordinaria. Una fresa ordinaria (Figura 1.14) es un cortador en forma de disco que tiene dientes solamente en la circunferencia; los dientes pueden ser rectos o helicoidales, éstos si el ancho excede de 15 [mm]. Los cortadores anchos helicoidales usados para trabajo pesado pueden tener hendiduras en los dientes para romper la viruta y facilitar su remoción.



Figura 1.14 Fresa ordinaria⁷

2.- Fresa de corte lateral. Este cortador es similar a la fresa para planear excepto que tiene dientes en un costado. Cuando dos cortadores operan juntos, cada cortador es plano en un lado y tiene dientes en el otro. Los cortadores laterales pueden tener dientes rectos, helicoidales o alternados (Figura 1.15).



Figura 1.15 Fresa de corte lateral⁸

3.- Fresa para ranurar. Este cortador tiene un parecido a la fresa para planear o al cortador lateral, solamente que se hace en espesores muy pequeños, usualmente 5 [mm] o menos; las fresas de este tipo se rebajan de los lados para darles incidencia (Figura 1.16).

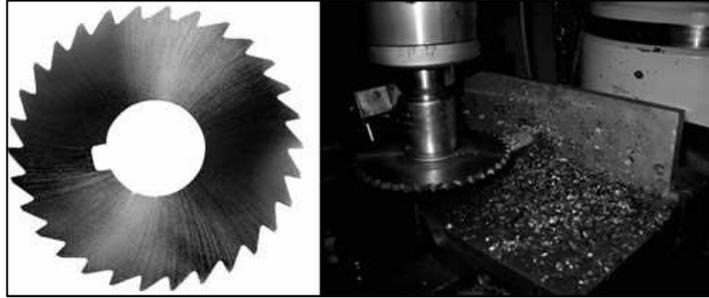


Figura 1.16 Fresa de ranurar⁹

4.- Fresa angular. Cualquier fresa formada en ángulo cae dentro de esta clasificación. Se les fabrica con un solo ángulo o con ángulo doble (Figura 1.17). Cuando la fresa es de un solo ángulo, tiene una superficie cónica mientras que cuando es de doble ángulo tiene dientes en dos superficies cónicas. Los cortadores angulares se usan para cortar ruedas de trinquete, colas de milano, ranuras en cortadores y rimas.



Figura 1.17 Fresa angular¹⁰

5.- Fresas de forma. Los dientes en estos cortadores son de una forma especial, incluyendo cortadores cóncavos y convexos, cortadores para engranes, cortadores para ranuras, cortadores para redondear esquinas y muchos otros (Figura 1.18).



Figura 1.18 Fresa de forma¹¹

6.- Fresa cilíndrica frontal. Estos cortadores tienen un vástago integrado para su movimiento y tienen dientes en la periferia y en el extremo, las ranuras pueden ser rectas o helicoidales (Figura 1.19). Los cortadores grandes llamados fresas frontales sin vástago tienen la parte cortante separada y se montan en un eje corto, como se muestra en la Figura 1.22. Debido al alto costo del acero de alta velocidad, esta construcción resulta con un considerable ahorro en el costo del material.



Figura 1.19 Fresa cilíndrica frontal¹²

7.- Fresas para ranuras en T. Los cortadores de este tipo tienen semejanzas con las fresas para planear o con las de corte lateral pequeñas. Estos cortadores tienen un vástago cilíndrico o cónico para su accionamiento, son usados para el fresado de ranuras en T (Figura 1.20).



Figura 1.20 Fresas para ranura en T¹³

8.- Fresas con dientes postizos. Las fresas de dientes postizos pueden tener dichos dientes soldados a la masa o bien formando pequeñas herramientas independientes (insertos) que se sujetan a un portainsertos (Figura 1.21). Conforme aumenta la medida del cortador, es económico insertar los dientes hechos de material caro en el cuerpo que es manufacturado de un acero barato. Los dientes de los cortadores se remplazan cuando se desgastan o se rompen.



Figura 1.21 Fresa con dientes postizos¹⁴

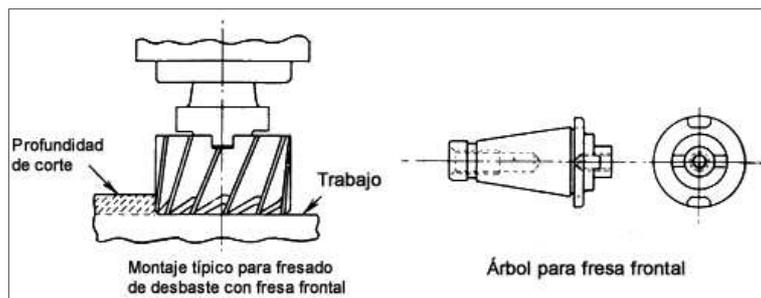


Figura 1.22 Dispositivo para montar fresa¹

1.2.1 Dientes de fresas

Un cortador típico para fresadora con la nomenclatura de los diferentes ángulos del cortador se muestra en la Figura 1.23. Para la mayoría de los cortadores de alta velocidad se usan *ángulos radiales de ataque* y tienen un valor entre 10 y 15°. Estos valores son satisfactorios para la mayoría de los materiales y representan una solución intermedia entre un corte óptimo y la resistencia de la herramienta.

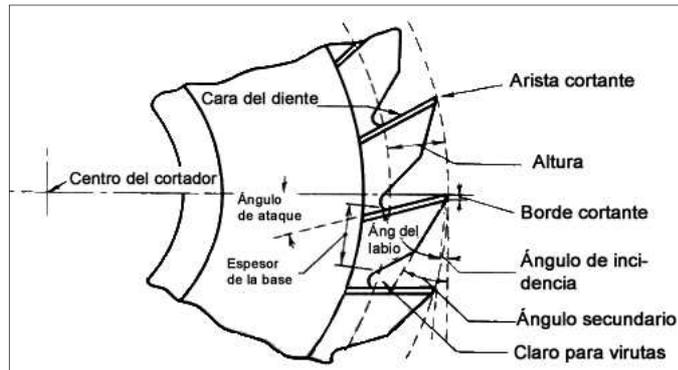


Figura 1.23 Nomenclatura del cortador y sus ángulos¹

Usualmente solo la fresa del tipo sierra y angostas para planear, tienen dientes con ángulo radial nulo. Conforme aumenta el ancho del cortador se usa un ángulo axial de ataque positivo para incrementar la acción cortante.

Para fresado de alta velocidad se emplean cortadores con insertos de carburo, por lo general tienen ángulos negativos de ataque (tanto radiales como axiales) teniendo como resultado mayor vida de la herramienta al aumentar el ángulo del labio, también el diente resiste mejor las cargas producidas por el choque. Las fresas para planear con dientes en la periferia usualmente tienen ángulo de ataque negativo entre 5 y 10° cuando cortan acero. Los aceros de medio carbono y aleaciones requieren un mayor ángulo negativo de corte que los aceros blandos. Las excepciones del uso de ángulo negativo de corte para cortadores de carburo se encuentran en las fresas para mecanizado de aleaciones no ferrosas.

El ángulo de incidencia es el ángulo formado por el borde cortante y la tangente al cortador desde la punta del diente. Para la mayoría de los cortadores comerciales con un diámetro mayor de 75 [mm] el ángulo de incidencia tiene un valor entre 4 y 5°. Para los cortadores de diámetro pequeño se aumenta este ángulo para eliminar la tendencia del diente a rozar con la pieza de trabajo. Los valores del ángulo de incidencia también dependen del tipo de material que se trabaja; el hierro colado requiere valores entre 4 y 7°, mientras los materiales más suaves, como el magnesio, aluminio y latón se cortan eficientemente con ángulos de incidencia entre 10 y 12°. El ancho del borde cortante debe mantenerse pequeño, generalmente entre 0.8 y 1.6 [mm]. Para mantener el borde cortante dentro de los límites apropiados se esmerila un ángulo de incidencia secundario partiendo del filo.

La investigación efectuada sobre la forma y el tamaño del diente ha probado que los dientes bastos son más eficientes que los finos para remover metal; un cortador con dientes bastos corta viruta más gruesa y tiene una acción de corte más libre y mayor espacio para las virutas. Como consecuencia, estos cortadores aumentan la producción y disminuyen el consumo de potencia para una cantidad dada de metal desprendido, por otra parte los cortadores con dientes finos tienen mayor tendencia a vibrar que los cortadores con dientes bastos, sin embargo, se recomienda para cortadores tipo sierra usados en el fresado de materiales delgados.

1.3 Parámetros del fresado

La velocidad de corte v_c en el fresado es la velocidad periférica del cortador

$$v_c = \pi d N \quad (1.1)$$

donde (Figura 1.27b):

v_c velocidad de corte [mm/min]

d diámetro del cortador [mm]

N velocidad de rotación [RPM]

En la adecuada selección de la velocidad de corte los siguientes factores deben ser considerados:

1.-Material del cortador. Las velocidades de corte generalmente están dadas para cortadores de acero de alta velocidad. Estos valores son el doble de los correspondientes a los aceros al carbono y un cuarto de los recomendados para cortadores con insertos de carburo.

2.- Clase del material que se corta. La dureza Brinell de un material es una guía de la facilidad de maquinado. Los materiales suaves como el magnesio y el aluminio pueden fresarse a velocidades mucho más altas que los materiales más duros.

3.- Tipo de acabado requerido. Los mejores acabados son obtenidos con avances pequeños y altas velocidades de corte. En general la velocidad de corte para acabado deber ser alrededor del 20% más alta que la de cortes de desbaste.

4.- Vida del cortador. Los cortes fuertes que acumulan calor rápidamente deben tomarse con más lentitud que los cortes ligeros. Para prolongar la vida del cortador deben usarse bajas velocidades de corte.

5.- Uso de un refrigerante. Las altas velocidades de corte generan mucho más calor que debe disiparse para proteger a la pieza y al cortador. La herramienta y la pieza deben lubricarse

con un refrigerante como el soluble. Una excepción la constituye el hierro colado que es fresado a menudo en seco, por la acción lubricante del grafito. El petróleo y el aceite soluble con frecuencia se usan como refrigerantes para el aluminio. Puesto que las mezclas de agua y soluble representan un peligro de fuego en el maquinado del magnesio (pues éste reacciona con vapor de agua), solamente deben usarse aceites de corte.

Nótese que el espesor de la viruta en el fresado plano varía en su longitud debido al movimiento longitudinal relativo entre el cortador y la pieza de trabajo. Para un cortador de dientes rectos podemos determinar *el espesor de viruta no deformado (profundidad de corte de viruta)*, t_c , de la ecuación:

$$t_c = \frac{2f_z t}{d} \quad (1.2)$$

donde

t_c espesor de viruta no deformado [mm]

f_z avance por diente del cortador, medido a lo largo de la superficie de la pieza de trabajo [mm/diente] o [in/diente]

t profundidad de corte [mm]

d diámetro del cortador [mm]

Conforme el valor de t_c se hace más grande, la fuerza en el diente del cortador se incrementa.

El avance por diente está determinado por la ecuación:

$$f_z = \frac{v}{Nz} \quad (1.3)$$

donde

f_z avance por diente [mm/diente]

v velocidad lineal de la pieza de trabajo [mm/min]

z número de dientes en la periferia del cortador [diente]

N velocidad de giro del husillo [RPM]

El tiempo de corte t está dado por la siguiente expresión:

$$t = \frac{(l + l_c)}{v} \quad (1.4)$$

donde (Figura 1.27c):

t tiempo de corte [min]

l longitud de la pieza de trabajo [mm]

l_c extensión del primer contacto del cortador con la pieza de trabajo [mm]

v velocidad lineal [mm/min]

En el fresado periférico así como en el corte con una fresa común, la cantidad de metal desprendida es en primer lugar una función del avance de la pieza de trabajo. Se le puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$R = twf \quad (1.5)$$

donde

R cantidad de metal removido [mm³/min]

t profundidad de corte [mm]

w ancho del corte [mm]

f avance [mm/min]

Al calcular el tiempo necesario para hacer un solo corte en una pieza dada, habrá que referirse a la Figura 1.24. La longitud total de corte es algo mayor que la longitud de la pieza, debido a la distancia de acercamiento S requerida para el cortador. La distancia de aproximación puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - \left(\frac{d}{2} - t\right)^2} = \sqrt{t(d-t)} \quad (1.6)$$

donde

S distancia de acercamiento del cortador a la pieza [mm]

d diámetro del cortador [mm]

t profundidad de corte [mm]

A este resultado debe sumársele 6.0 [mm] más o menos para prever un recorrido extra del cortador. Esta distancia se divide entre el principio y el final del corte, permitiendo una posible variación en la longitud de la pieza. El recorrido total es:

$$s_t = L + \sqrt{t(d-t)} + 6 \quad (1.7)$$

donde

s_t recorrido total [mm]

L longitud de la pieza [mm]

t profundidad de corte [mm]

El tiempo real de corte se puede determinar por:

$$T = \frac{L + \sqrt{t(d-t)} + 6}{f} \quad (1.8)$$

donde

T tiempo de corte [min]
 L longitud de la pieza [mm]
 t profundidad de corte [mm]
 d diámetro del cortador [mm]
 f avance [mm/min]

Para obtener el tiempo total del ciclo deberá añadirse el tiempo real de corte, el tiempo de la carreta de retorno en vacío y el tiempo de maniobra del material.

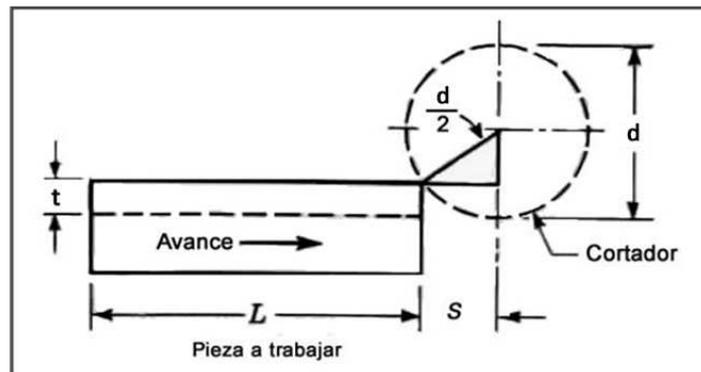


Figura 1.24 Ilustración de la distancia de acercamiento del fresado¹

1.4 Operaciones de fresado

En el *fresado* se incluyen varias operaciones de maquinado muy versátiles, capaces de producir una diversidad de configuraciones (Figura 1.25) usando una fresa (cortador) que es una herramienta de varios dientes que produce varias virutas en una revolución. Las piezas como las que se ven en la Figura 1.26 se pueden fabricar muy bien con distintos tipos de fresas.

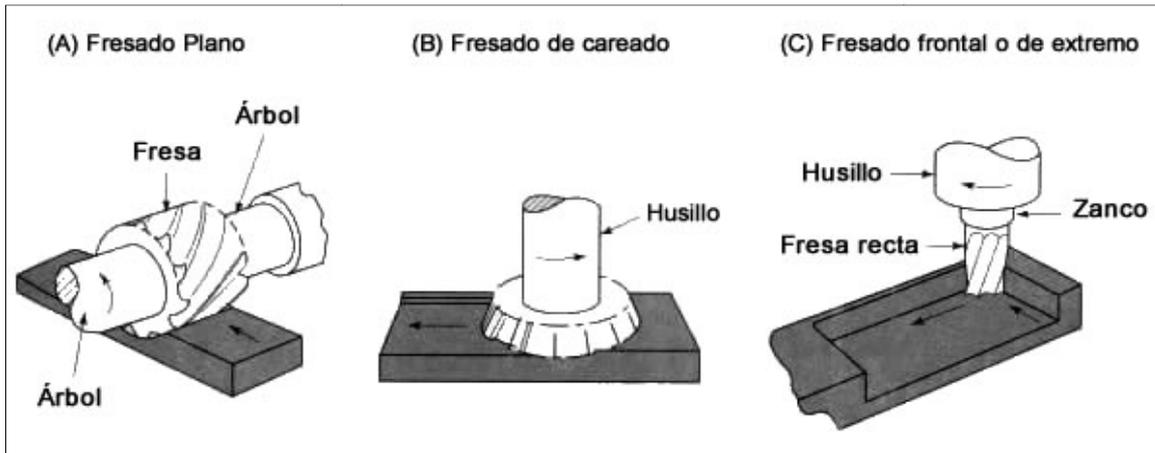
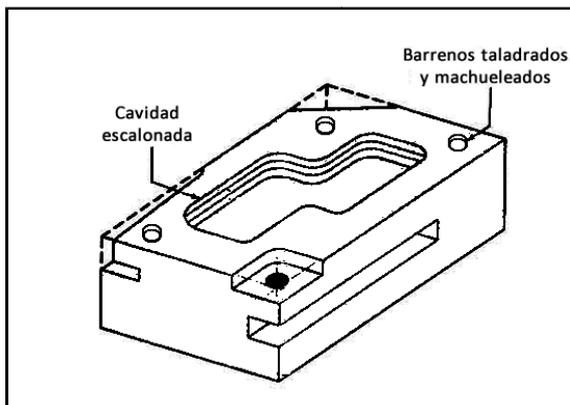


Figura 1.25 Algunos de los tipos básicos de fresas y operaciones de fresado¹⁵



se puede producir con controles piezas se pueden a y en formas con control ido, sin necesidad ni la sujeción de la

1.4.1 Fresado horizontal

En el *fresado plano*, también llamado *fresado periférico*, el eje de rotación del cortador es paralelo a la superficie de la pieza de trabajo que se va a maquinar (Figura 1.25A). El cortador, generalmente hecho de acero de alta velocidad, tiene varios dientes en su circunferencia y cada diente actúa como una herramienta de corte simple llamado cortador recto.

Los cortadores usados en el fresado periférico pueden tener *dientes rectos* o *helicoidales*, produciendo acción de corte ortogonal u oblicua. Los dientes helicoidales del cortador mostrados en la Figura 1.25A se prefieren sobre dientes rectos porque la carga en el diente es menor, lo que resulta en una operación más fina, que reduce las fuerzas sobre la herramienta y las vibraciones.

1.4.2 Fresado convencional y fresado concurrente

En el *fresado convencional*, llamado también *hacia arriba* o *contra el avance*, el espesor máximo de la viruta está al final del cortador (Figura 1.27 a y b). La ventaja es que el agarre del diente no es función de las características en la superficie de la pieza de trabajo, la contaminación o escoria no afecta la vida de la herramienta. Este es el método dominante de fresado. El proceso de corte es uniforme, siempre que el cortador esté afilado. Sin embargo hay una tendencia de la herramienta a vibrar. También, la pieza de trabajo tiene una tendencia a ser jalada hacia arriba, es por eso que una adecuada sujeción es importante.

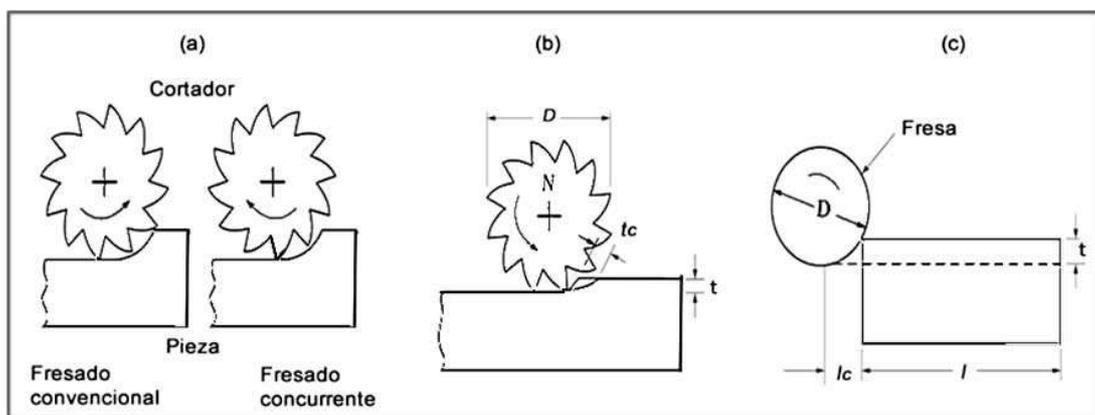


Figura 1.27 (a) Esquema del fresado convencional y fresado concurrente. (b) Fresado plano, con la profundidad de corte d , avance por diente f , profundidad de corte de viruta t_c y velocidad de la pieza v . (c) l_c de la fresa para obtener toda la profundidad de corte.¹⁵

En el *fresado concurrente*, llamado también *hacia abajo* (el giro del cortador está en la misma dirección que el avance de la pieza) el corte comienza en la superficie, donde la viruta tiene su mayor espesor. La ventaja es que la componente hacia abajo de las fuerzas de corte mantiene a la pieza de trabajo en su lugar. Sin embargo, debido a las altas fuerzas de impacto cuando los dientes entran a la pieza, esta operación debe tener un soporte rígido y se debe eliminar el juego en el mecanismo de engranes de avance de la mesa.

El *fresado concurrente* o *paralelo* no es adecuado para maquinar piezas que tengan escoria en la superficie, como son los metales trabajados en caliente, las piezas forjadas y las piezas fundidas. La escoria es dura, abrasiva, causa daño y desgaste excesivo en los dientes del cortador, por tanto la vida de la herramienta puede disminuir. Este tipo de fresado es recomendado, en general, cuando se usan máquinas CNC para aprovechar al máximo la vida del cortador.

1.4.3 Fresado de refrentado

En el *fresado de refrentado, de cara o careado*, el cortador se monta en un husillo que tiene un eje de rotación perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo (Figura 1.25b) y remueve material como se muestra en la Figura 1.28a. El cortador gira a una velocidad de rotación N y la pieza de trabajo se mueve a través de una trayectoria recta a una velocidad lineal v . Cuando el cortador gira como se muestra en la Figura 1.28b, la operación se llama *fresado ascendente, paralelo o concurrente*; cuando gira en la dirección opuesta (Figura 1.28c) la operación se llama *fresado en oposición o convencional*. Las herramientas de corte son usualmente insertos de carburo o de HSS (ver Tabla 1.2) y se montan en el portafresas como se muestra en la Figura 1.29.

Debido al movimiento relativo entre los dientes cortantes y la pieza de trabajo, el cortador deja *marcas de avance* en la superficie maquinada (Figura 1.30 y Figura 1.37). Hay que tomar en cuenta que la rugosidad de la superficie depende de la geometría del filo del inserto y del avance por diente.

La terminología para el cortador empleado en este tipo de fresado y los diversos ángulos se muestran en la Figura 1.31. La vista de lado se muestra en la Figura 1.32, donde se ve que el *ángulo de posición o avance* del inserto en el careado tiene una influencia directa en el *espesor de viruta no deformada*. Conforme este ángulo crece (positivo como se muestra), el *espesor de viruta no deformada* (así como el espesor en general de la viruta) decrece y la longitud de contacto se incrementa.

El rango de ángulos de avance para la mayoría de los cortadores es de 0° a 45° , lo que influye en las fuerzas axial y tangencial. Nótese que el área transversal de la viruta no deformada permanece constante. El ángulo de presión también influye sobre las fuerzas en el fresado. Se puede ver que a medida que disminuye el ángulo de avance hay una componente vertical de la fuerza cada vez más pequeña (fuerza axial sobre el husillo de la fresa)

Existe una amplia variedad de cortadores. El diámetro del cortador se debe escoger de tal manera que no interfiera con la sujeción u otros dispositivos. En una operación típica de careado, la proporción del diámetro del cortador d entre el ancho de corte w no debe ser menor que 3:2.

La relación entre el diámetro del cortador y los ángulos de los insertos, así como su posición relativa a la superficie que va a ser fresada es importante, ya que determina el ángulo con

que *entra y sale* de la pieza de trabajo. Véase en la Figura 1.28b que para un fresado paralelo con ángulos de ataque axial y radial iguales a cero (Figura 1.31), la superficie de ataque del inserto entra de frente a la pieza.

Sin embargo, como se ve en la Figura 1.33a y b, el mismo inserto penetra la pieza de trabajo a diferentes ángulos dependiendo de las posiciones relativas del cortador y de la pieza. En la ilustración a), la punta del inserto hace el primer contacto, por lo que hay la posibilidad de que se despostrille el filo.

Por otra parte, en la ilustración b) los primeros contactos (entrada, reentrada, y las dos salidas) están en ángulo y alejados de la punta del inserto. En consecuencia hay menos tendencia del inserto a fallar, porque las fuerzas sobre él varían con más lentitud. Obsérvese en la Figura 1.31 que los ángulos de ataque radial y axial también tienen su efecto. La Figura c) muestra los ángulos de salida para varias posiciones del cortador. En los primeros dos ejemplos, el inserto sale de la pieza de trabajo formando un ángulo y hace que la fuerza sobre él se reduzca a cero con menor rapidez (preferible), en el tercer ejemplo el inserto sale repentinamente (desfavorable).

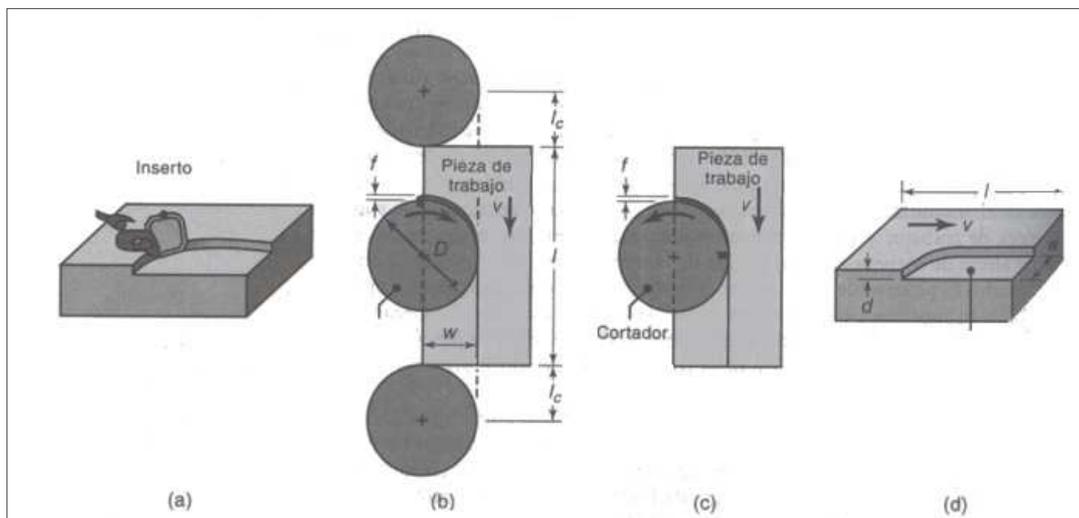


Figura 1.28 Operación de fresado de refrentado mostrando (a) la acción de un inserto, (b) fresado concurrente, (c) fresado convencional, (d) dimensiones en el fresado de refrentado. El ancho de corte, w , no necesariamente es igual al radio de la fresa.¹⁵

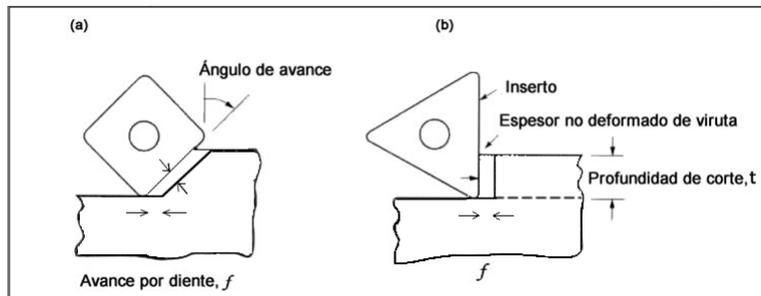


Figura 1.32 Efecto del ángulo de avance sobre el espesor no deformado de viruta en el fresado de careado. Nótese que cuando aumenta el ángulo de presión disminuye el espesor de la viruta, pero aumenta la longitud de contacto (es decir, el ancho de viruta). El inserto de (a) debe ser suficientemente grande para que abarque el aumento en la longitud de contacto.¹⁵

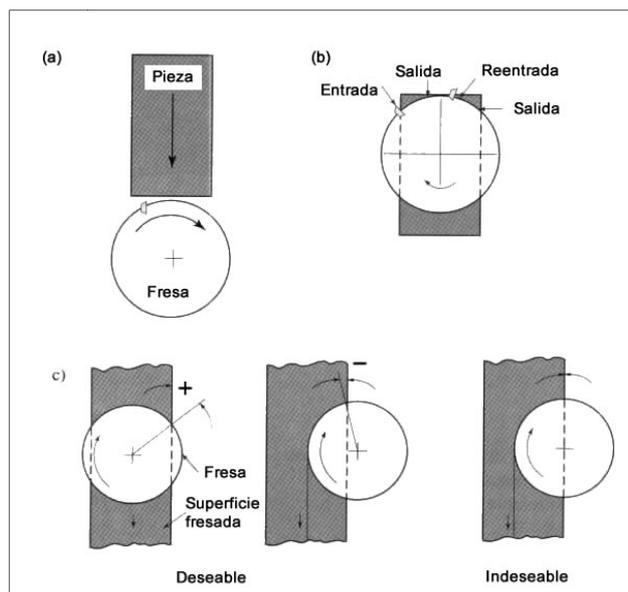


Figura 1.33 (a) Posición relativa de la fresa y el inserto al entrar por primera vez a la pieza en el careado; (b) posiciones del inserto al terminar el corte y (c) ejemplos de ángulos de salida del inserto, mostrando las posiciones deseables (ángulo positivo y negativo) e indeseables (ángulo cero). En todas las figuras, el husillo de la fresa es perpendicular a la página.¹⁵

1.4.4 Fresado frontal o de acabado.

El cortador para fresado de acabado se muestra en la Figura 1.25c. Tiene zancos rectos o cónicos, para las fresas pequeñas y grandes, respectivamente. Usualmente, el cortador gira en un eje perpendicular a la pieza de trabajo, aunque se puede inclinar para maquinarse las superficies oblicuas.

También se consiguen fresas frontales con extremos hemisféricos (*de nariz de bola*) para producir superficies curvas, como en dados y moldes. Las *fresas huecas* tienen dientes internos y se usan para maquinarse la superficie cilíndrica de piezas redondas sólidas. Las fresas frontales son de aceros rápidos o tienen insertos de carburo.

1.4.5 Otros tipos de fresado y sus cortadores

Para maquinarse diversas superficies se usan otras operaciones de fresado y sus fresas. En el *fresado compuesto (gemelo)* se montan dos o más fresas en un eje y con ellas se maquinan dos o más superficies paralelas sobre la pieza (Figura 1.34a). El *fresado de forma* produce perfiles curvos empleando cortadores que tienen dientes muy afilados (Figura 1.34b); esas fresas se usan también para tallar dientes de engranes.

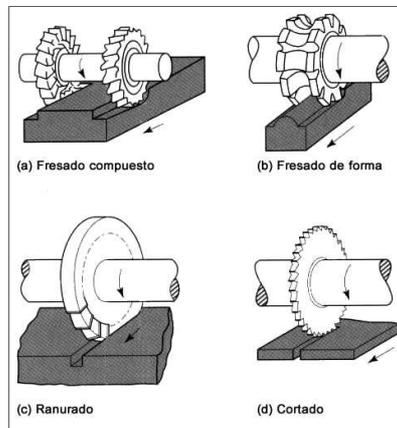


Figura 1.34 Fresas para (a) fresado compuesto, (b) fresado de forma, (c) ranurado y (d) tronzado.¹⁵

Las *fresas circulares* para ranurar y cortar se ven en las Figuras 1.34c y d, respectivamente. Los dientes pueden estar ligeramente triscados, como los de una segueta para proporcionar la holgura a la fresa cuando se cortan ranuras hondas. Las *sierras de cortar* son relativamente delgadas, por lo general de menos de 5 [mm] (3/16 [in]). Las *fresas para ranuras en T* (Figura

1.35a) son para maquinarse ranuras como las de las mesas de máquinas herramientas, para sujetar las piezas. Primero se fresa una ranura con una fresa frontal. A continuación la fresa de ranura en T corta el perfil completo de la ranura en un paso.

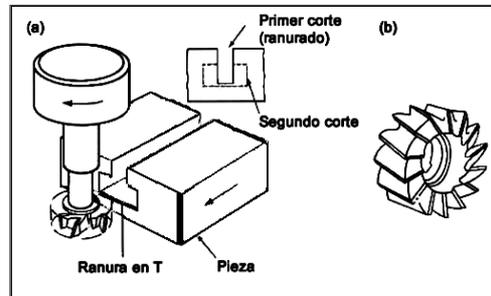


Figura 1.35 (a) Corte de una ranura en T con fresa. (b) Una fresa hueca.¹⁵

Las fresas de *cuñeros* se usan para cortar los cuñeros rectangulares y semicilíndricos (Woodruff) en los ejes. Las *fresas en ángulo* (ángulo sencillo o doble) se emplean para producir superficies cónicas con varios ángulos.

Las *fresas huecas* (Figura 1.35b) se montan en un eje; esto permite usar el mismo eje con fresas de diversos tamaños. El empleo de las fresas huecas se parece al de fresas frontales.

1.5 Portaherramientas

Las fresas se clasifican en fresas de eje y fresas de zanco. Las *fresas de eje* se montan en un eje (Figura 1.36) en operaciones como fresado plano, refrentado, compuesto, y de contorno. En las *fresas de zanco*, la fresa y el zanco son una pieza. Los ejemplos más comunes de fresas de zanco son las de calado. Aunque las fresas pequeñas frontales tienen zancos rectos, las mayores tienen zancos cónicos para poder sujetarse mejor y resistir las mayores fuerzas y pares que se desarrollan.

Las fresas con zancos rectos se montan en broqueros de pinzas (boquillas) o en sujetadores especiales; las de zancos cónicos se montan en portaherramientas cónicos. Además de los portaherramientas mecánicos, se consiguen portaherramientas y ejes hidráulicos. La rigidez de las fresas y sus portaherramientas es importante en la calidad de la superficie y para reducir la vibración durante las operaciones de fresado. Los portaherramientas cónicos convencionales

tienen tendencia a desgastar y abocardarse, debido a las fuerzas radiales que se desarrollan en el fresado.

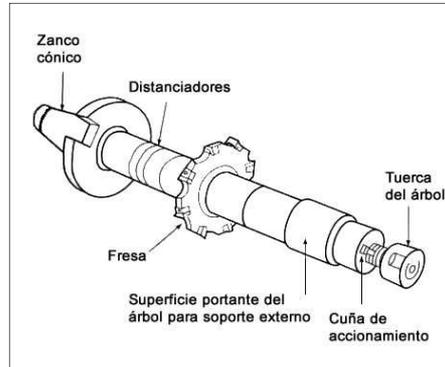


Figura 1.36 Montaje de una fresa en un eje de una fresadora horizontal.¹⁵

Problema	Causas probables
La herramienta se rompe	El material de la herramienta carece de tenacidad, ángulos de la herramienta equivocados, parámetros de corte muy altos.
Desgaste excesivo de la herramienta	Parámetros de corte muy altos, el material de la herramienta es inadecuado, ángulos de la herramienta equivocados, fluido de corte incorrecto
Acabado superficial burdo	Avance muy alto, velocidad del husillo muy baja, muy pocos dientes en el cortador, herramienta usada o maltratada, vibración
Tolerancias muy amplias	Falta de rigidez en el husillo, aumento excesivo de temperatura, amontonamiento de la viruta, herramienta desafilada
Superficie bruñida de la pieza	Herramienta desafilada, profundidad de corte muy pequeña, ángulo de desahogo radial muy pequeño.
Rebote	Herramientas desafiladas, husillo de la fresa inclinado, ángulo de herramienta negativos
Marcas vibración	Rigidez insuficiente del sistema, vibraciones externas, avance, profundidad y ancho de corte muy grandes, geometría incorrecta del inserto.
Formación de rebaba	Filos desafilados o demasiado asentados, ángulo de entrada o salida incorrecto, avance y profundidad de corte muy alta, geometría del inserto equivocada
Rotura de la pieza	Ángulo de avance demasiado bajo, geometría incorrecta del filo, ángulo de entrada o de salida incorrecto, demasiado avance y profundidad de corte.

Tabla 1.1 Guía general para resolver problemas en operaciones de fresado

Material de la pieza de trabajo	Herramienta de corte	Condiciones iniciales de propósito general		Intervalo de condiciones	
		Avance mm/diente (in/diente)	Velocidad m/min (ft/min)	Avance mm/diente (in/diente)	Velocidad m/min (ft/min)
Aceros de bajo carbono y de libre maquinado	Carburo no recubierto, recubierto, cermets	0.13-0.20 (0.005-0.008)	120-180 (400-600)	0.085-0.38 (0.003-0.015)	90-425 (300-1400)
Aceros aleados Suaves Duros	No recubierto, recubierto, cermets. Cermets, BN, policristalino	0.10-0.18 (0.004-0.007)	90-170 (300-550)	0.08-0.30 (0.003-0.012)	60-370 (200-1200)
		0.10-0.15 (0.004-0.006)	180-210 (600-700)	0.08-0.25 (0.003-0.010)	75-460 (250-1500)
Hierro fundido gris. Suave Dura	No recubierto, recubierto, cermets, SiN. Cermets, SiN, PCBN	0.10-0.20 (0.004-0.008)	120-760 (400-2500)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	90-1370 (300-4500)
		0.10-0.20 (0.004-0.008)	120-210 (400-700)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	90-1370 (300-4500)
Acero inoxidable, austenítico	No recubierto, recubierto, cermets	0.13-0.18 (0.005-0.007)	120-370 (400-1200)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	90-500 (300-1800)
Aleaciones para alta temperatura a base de níquel	No recubierto, recubierto, cermets, SiN, BN, policristalino	0.10-0.18 (0.004-0.007)	30-370 (100-1200)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	30-550 (90-1800)
Aleaciones de titanio	No recubierto, recubierto, cermets.	0.13-0.15 (0.005-0.006)	50-60 (175-200)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	40-140 (125-450)
Aleaciones de aluminio Libre maquinado Alto silicio	No recubierto, recubierto, diamante policristalino. Diamante policristalino	0.13-0.23 (0.005-0.009)	610-900 (2000-3000)	0.08-0.46 (0.003-0.018)	300-3000 (1000-10000)
		0.13 (0.005)	610 (2000)	0.08-0.38 (0.003-0.015)	370-910 (1200-3000)
Aleaciones de cobre	No recubierto, recubierto, diamante policristalino	0.13-0.23 (0.005-0.009)	300-760 (1000-200)	0.08-0.46 (0.003-0.018)	90-1070 (300-3500)
Termoplásticos y termofijos	No recubierto, recubierto, diamante policristalino	0.13-0.23 (0.005-0.009)	270-460 (900-1500)	0.08-0.46 (0.003-0.018)	90-1370 (300-4500)

Tabla 1.2 Recomendaciones generales para operaciones de fresado

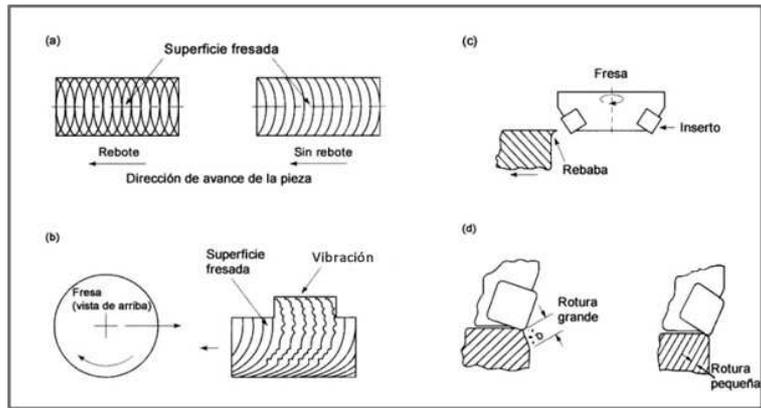


Figura 1.37 Marcas superficiales y defectos en aristas en operaciones de fresado de refrentado. Véase la descripción de las fallas en la Tabla 1.1.¹⁵

Capítulo II. Técnicas de optimización de maquinado

El corte de metales es uno de los procesos de fabricación más importantes y es ampliamente usado en la industria. Su estudio se centra, entre otras cosas, en las características de las herramientas, los materiales de trabajo y los parámetros de las máquinas, ya que éstos influyen en la eficiencia del proceso y las características de la pieza final. Se puede obtener una mejora considerable en la eficiencia del proceso mediante la optimización de los parámetros que intervienen en éste, al identificar y determinar los valores críticos de los factores que controlan el proceso; esto conduce a una producción deseada, lo que asegura un costo más bajo de fabricación (Montgomery, 1990)¹⁸.

Desde hace mucho tiempo se ha sabido que las condiciones durante el corte, como avance, velocidad de corte y profundidad de corte, se deben controlar para lograr optimizar la economía de los procesos de maquinado. Taylor (1907)²⁰ mostró que existe una velocidad óptima o económica de corte, la cual puede maximizar la tasa de remoción de material. Por mucho tiempo, las industrias manufactureras han dependido de las habilidades y la experiencia de los operadores para la selección óptima de los parámetros y de las herramientas de corte. Es considerable, todavía, el uso de manuales para fijar las condiciones de corte y seleccionar las herramientas; esto regularmente resulta en decisiones muy cautelosas y conservadoras. El efecto más adverso de esta práctica, nada científica, es el decremento de la productividad, debido a que el uso de la máquina se encuentra por debajo de su nivel óptimo.

Por décadas, se ha tenido la necesidad de establecer condiciones óptimas de maquinado y de seleccionar la herramienta más adecuada. A pesar del trabajo de Taylor para establecer las condiciones óptimas de velocidad de corte en operaciones de torneado de una pasada, el progreso ha sido muy lento, ya que todos los procesos de maquinado necesitan ser optimizados. Además, para aplicar soluciones a casos reales, deben superarse las restricciones que se encuentran en la práctica, tales como la baja potencia en la máquina, en el par de torsión de la máquina o también la rugosidad solicitada de la superficie.

El que no se disponga de una ecuación que describa el desempeño durante el proceso representa un gran obstáculo para la implementación de las condiciones óptimas de corte. Esto se debe a que, para un proceso de maquinado, se requieren una gran cantidad de ensayos para establecer las ecuaciones del desempeño para cada combinación de recubrimiento en la herramienta con el material de la pieza de trabajo, lo cual puede resultar muy caro si se consideran muchos escenarios de corte. Además, estas ecuaciones tienen que estar actualizadas para los nuevos recubrimientos, materiales de trabajo y herramientas. Mientras que un conjunto de ecuaciones pueden encontrarse en algunos manuales chinos y rusos (Ai et al 1966²¹; Ai & Xiao 1985²²; Kasilova & Mescheryakov 1985²³), así como también en algunos norteamericanos (ASME 1952²⁴) y Kroneberg's (1966)²⁵, la mayoría de los autores de libros de texto no incluyen información de herramientas modernas, nuevos materiales de trabajo y nuevos recubrimientos en las herramientas. Cuando se quieren conocer las ecuaciones del desempeño de las nuevas herramientas, se encuentran algunas dificultades, porque están protegidas por la empresa propietaria (Sandvik 1981)²⁶, como se halló en algunas investigaciones (Armarego & Ostafiev 1998²⁷; Ostafiev 1999²⁸).

La tecnología para corte de metales ha crecido sustancialmente a través del tiempo, debido a la contribución de muchas ramas de la ingeniería que tienen el objetivo común de alcanzar una eficiencia mayor en el proceso de maquinado. La selección de condiciones óptimas de maquinado es un factor clave en la realización de este objetivo (Tan & Creese, 1995)²⁹. En cualquier operación de corte de varias etapas, el fabricante intenta poner las variables de control del proceso en sus condiciones óptimas de operación, buscando el mínimo efecto de las variables que no se pueden controlar. Para diseñar e implementar un control de proceso eficaz en una operación de corte, mediante la optimización de los parámetros de éste, el fabricante busca el equilibrio entre la calidad y el costo en cada etapa de la operación, lo que da por resultado un mejor desempeño y resultado del proceso.

Existen muchos procesos de maquinado, pero los cruciales, los que producen componentes de ensambles y productos finales son el taladrado, torneado, fresado, brochado, rectificando y esmerilado. La optimización de los parámetros de estas operaciones de maquinado se tiene que llevar a cabo en dos etapas:

- 1.- Modelado de la relación entre los parámetros de entrada-salida y durante el proceso.
- 2.- Determinación de las condiciones óptimas de corte.

El modelado de la relación de los parámetros de entrada-salida y durante el proceso se considera como una representación abstracta del proceso que liga causas y efectos, o también, como algo que transforma entradas del proceso en salidas de éste (Markos Viharos & Monostori, 1998)³⁰. El modelo resultante proporciona la herramienta matemática básica que se requiere para el planteamiento de la función objetivo del proceso. Una técnica de optimización proporciona soluciones óptimas de manera global al problema propuesto, para posteriormente utilizarse en un proceso de corte real.

Con el tiempo, conforme creció considerablemente la complejidad en la dinámica de los procesos de corte, profesionales e investigadores se han enfocado en técnicas matemáticas de modelado para determinar las condiciones óptimas de corte, usando para ello criterios con diferentes objetivos (Tan & Creese, 1995)²⁹. Se han propuesto y ejecutado varias técnicas de modelado que se basan en regresión estadística (Montgomery & Peck, 1992)³¹, redes neuronales artificiales (Fu, 2003)³² y conjuntos difusos (Zadeh, 1973)³³. Algunas herramientas y técnicas de optimización propuestas se basan en el Método de Taguchi (Ross, 1989)³⁴, método de superficie de respuesta (Montgomery, 2001)³⁵, programación matemática (Hillier & Liebermann, 1999)³⁶, algoritmo genético (Goldberg, 2002)³⁷, búsqueda tabú (Glover, 1990)^{38,39} y recocido simulado (Kirkpatrick, Gelett, & Vecchi, 1983)⁴⁰.

A pesar de que existen numerosos estudios en problemas de optimización, no existe un modelo universal que relacione los parámetros de entrada-salida y durante el proceso que sea aplicable a todos los tipos de procesos de maquinado (Hassan & Suliman, 1990)⁴¹. Luong & Spedding (1995)⁴² comentan que no existe un modelo matemático básico que pueda predecir el comportamiento de los procesos de corte para un amplio rango de condiciones de corte. Las técnicas de optimización tienen ciertas restricciones, suposiciones y limitaciones para su implementación en procesos de corte reales.

En el presente capítulo se darán a conocer de manera general algunas técnicas de optimización empleadas en los procesos de corte. Se mencionan algunos de los trabajos existentes en la literatura especializada, sin embargo, no se profundiza en las diferentes técnicas por ser muy amplias. El enfoque empleado es un breve vistazo al estado del arte.

Únicamente es analizado y estudiado a fondo el Método de Taguchi, el cual será el empleado para los fines de la presente investigación.

2.1 Modelado de la relación de los parámetros de entrada-salida y durante el proceso

Para la optimización de los parámetros en cualquier proceso de corte de metales, el primer paso es entender los principios que rigen el proceso, desarrollando un modelo matemático explícito, que puede ser de dos tipos: mecánico y empírico (Box & Draper, 1987)⁴³. La relación funcional entre los parámetros de entrada-salida y durante el proceso, según lo determinado analíticamente para un proceso de corte se llama modelo mecánico. Sin embargo, debido a la carencia de modelos mecánicos adecuados y aceptables para procesos de corte (Luong & Spedding, 1995)⁴², se emplean generalmente los modelos empíricos.

Resulta innumerable la aplicación de técnicas de modelado de parámetros de entrada-salida y durante el proceso basadas en regresión estadística (Montgomery & Peck, 1992)³¹, redes neuronales artificiales (Fu, 2003)³² y conjuntos difusos (Zadeh, 1973³³; Klir & Yuan, 2002)⁴⁴. Aunque estas técnicas de modelado puedan funcionar satisfactoriamente en diversas situaciones, existen restricciones, suposiciones y defectos que limitan el uso de una técnica en especial.

2.1.1 Técnica de regresión estadística

La regresión es una técnica conceptualmente simple, cuyo fin es investigar la relación funcional entre las variables a la entrada y a la salida en un proceso de corte, puede ser útil para describir información del proceso, para controlar éste y estimar sus parámetros.

En la literatura existen varios modelos, para diferentes procesos de corte de metales, basados en ecuaciones de regresión (Ghoreishi, Low, & Li, 2002⁴⁵; Wasserman, 1996⁴⁶; Tosun & Ozlar, 2002⁴⁷). Hassan & Suliman (1990)⁴¹ usan un modelo de segundo orden de múltiple regresión para una operación de torneado de acero de medio carbono. Feng Jack and Wang (2002)⁴⁸ demostraron que para un conjunto considerablemente grande de información, el análisis de regresión genera resultados comparables al modelado en redes neuronales artificiales, aplicado a la predicción de la rugosidad de la superficie en un proceso de torneado. Lin, Bhattacharyya, y Kecman (2003)⁴⁹ mostraron que el modelo de regresión estadística puede hacer una buena predicción del desgaste de la herramienta, comparada con el de redes neuronales artificiales en un proceso común de torneado de aluminio.

Aunque la regresión estadística puede funcionar bien para modelar, puede que no describa con precisión la compleja relación no lineal entre las variables de entrada y las respuestas. Una suposición primaria con respecto a las relaciones funcionales (lineales,

cuadráticas, polinomiales y exponenciales) entre las salidas y las de la entrada, es un requisito previo para el modelo basado en la regresión. La predicción de la(s) salida(s) para un número desconocido de entradas, basada en la técnica de regresión, es válida solamente en el conjunto de variables independientes que están contenidas en los registros que se tienen del proceso.

2.1.2. Modelado basado en Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales pueden manejar la compleja relación de parámetros de entrada-salida y durante el proceso para los problemas de control del maquinado. Son una alternativa atractiva para muchos investigadores de los procesos de corte (Petri, Billo, & Bidanda, 1998⁵⁰; Zhang & Huang, 1995⁵¹), debido a la capacidad de este método sobre la relación no lineal en una operación de corte o sobre la forma de la relación funcional (lineal, cuadrática, polinomial o exponencial) entre las entradas, los parámetros durante el proceso y las salidas. Esta técnica, al permitir estimar múltiples variables, dinámicas y no lineales, soluciona problemas de manera autodidáctica y autoorganizativa (Fu, 2003)³². La inteligencia de una ANN (siglas en inglés de Artificial Neural Network, Red Neuronal Artificial) radica en el comportamiento colectivo de las llamadas “neuronas artificiales”, y basa su conocimiento del proceso en los datos de entrada y salida (Petri et al., 1998⁵²). Zang & Huang (1995)⁵¹ abordan las técnicas de modelado de procesos a través de ANN junto con su potencial aplicación. Coit, Jackson, y Smith (1998)⁵² consideran los aspectos prácticos de construir y validar modelos ANN. Viharos Monostori, y Markos (1999)⁵³ expusieron el control y monitoreo de un proceso de corte a través de una técnica ANN.

Vale la pena mencionar ciertas suposiciones, restricciones y limitaciones inherentes a la técnica. Solamente se emplean ANN cuando las técnicas de regresión no pueden proporcionar un modelo adecuado. Algunas de las desventajas de la técnica ANN son:

- 1.- Los parámetros del modelo pueden ser de difícil interpretación para una relación no lineal.
- 2.- Depende de conjuntos de datos voluminosos, si la información relativa al número de variables de entrada y salida con que se cuenta es escasa, puede resultar en un *sobreajuste* (Coit, & de Jackson; Smith, 1998)⁵² o puede terminar el entrenamiento del algoritmo antes de que alcance su punto óptimo o cuasióptimo.
- 3.- Hacer observaciones importantes o identificar valores atípicos puede no ser posible mediante esta técnica.

Siempre hay incertidumbre en la convergencia de los algoritmos cuando se usan modelos basados en ANN, generalmente el criterio de convergencia se basa en experiencias previas, las cuales se adquieren en aplicaciones anteriores.

2.1.3 Modelado basado en Conjuntos Difusos

La técnica de modelado basada en conjuntos difusos se prefiere, generalmente, cuando el conocimiento subjetivo o la opinión de los expertos en los procesos desempeña un papel dominante al definir la función objetivo y las variables de decisión (Zadeh, 1973a,b)³³. Kou & Cohen (1998)⁵⁴ enfatizaron en la importancia de la integración entre las técnicas ANN y Conjuntos Difusos para un control efectivo de un proceso de manufactura.

En la literatura se reportan muchas aplicaciones de modelos de procesos de corte de metales basados en la Teoría de Conjuntos Difusos. Kamatala, Baumgartner y Moon (1996)⁵⁵ desarrollaron un sistema basado en ésta para predecir la rugosidad de la superficie en una operación de torneado de acabado. Chen & Kumara (1998)⁵⁶ emplearon un híbrido entre ANN y Conjuntos Difusos para diseñar y controlar un proceso de esmerilado. Hashmi, El Baradie y Ryan (1998)⁵⁷ usaron Conjuntos Difusos para la selección de las condiciones de corte. Ip, W. L. R. (1998)⁵⁸ adoptó una regla, basada en Conjuntos Difusos, para el control del avance en el fresado superficial de una barra de acero de medio carbono, para mejorar la eficiencia y prolongar la vida de la herramienta. Al-Wedyan, Demirli y Bhat (2001)⁵⁹ usaron un modelado basado en Conjuntos Difusos para una operación de fresado.

Las técnicas de Conjuntos Difusos sufren de algunos inconvenientes, como lo son algunas reglas desarrolladas a partir del conocimiento de usuarios y de sus experiencias previas, ya que éstas no consideran los cambios dinámicos en los procesos de corte. Tampoco proporcionan ninguna manera para utilizar modelos analíticos de los procesos de corte (Shin & Vishnupad, 1996)⁶⁰.

2.2 Técnicas de optimización

Con el tiempo, la complejidad en la dinámica de los procesos de corte de metales ha aumentado y por consiguiente -en los problemas relacionados con la determinación de las condiciones óptimas corte- se trata con parámetros discretos y continuos, y con funciones objetivo diferenciables y no diferenciables. La búsqueda de soluciones óptimas o cuasióptimas a través de una técnica de optimización adecuada, basada en la relación de los parámetros de entrada-salida y

en una función objetivo, es una tarea importante y difícil para profesionistas e investigadores (Chen & Tsai, 1996⁶¹; Cakir & Gurarda, 2000⁶²; Hui, Leung, & Linn, 2001⁶³). Han sido desarrolladas una gran cantidad de técnicas para resolver estos tipos de problemas de optimización. Se pueden clasificar como convencionales y no convencionales. La Figura 2.1 proporciona una clasificación general de las diferentes técnicas de optimización y modelado.

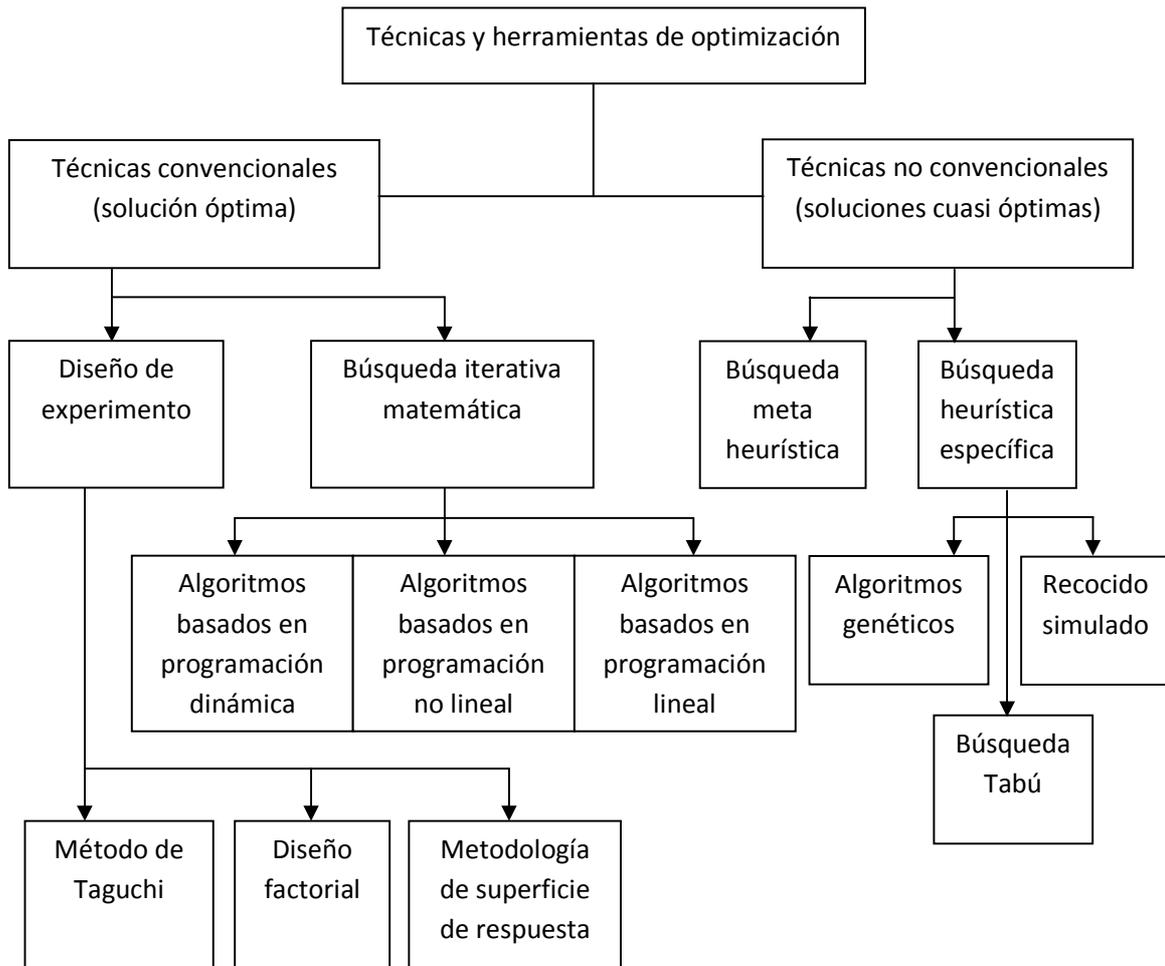


Figura 2.1 Técnicas de optimización y modelado.

Mientras que las técnicas convencionales intentan proporcionar una solución óptima, las no convencionales son solamente una aproximación, un intento de proporcionar condiciones de corte cuasióptimas. Las técnicas convencionales pueden ser clasificadas en dos categorías: en la primera están las técnicas experimentales, que incluyen el diseño de experimentos, como el Método de Taguchi y la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM, siglas en inglés de

Response Surface Methodology). En la segunda categoría, están las técnicas matemáticas de búsqueda iterativa, tales como Programación Lineal (LP de sus siglas en inglés *Linear Programming*), Programación No Lineal (NLP por sus siglas en inglés *Non Linear Programming*) y Algoritmos de Programación Dinámica (DP por sus siglas en inglés *Dynamic Programming*). Existen, además, técnicas meta heurísticas no convencionales que son lo suficientemente generales, las cuales han sido ampliamente usadas por investigadores de manera reciente, por ejemplo Algoritmos Genéticos (GA por sus siglas en inglés *Genetic Algorithm*), Búsqueda Tabú (TS por sus siglas en inglés *Tabu Search*), y Recocido Simulado (SA por sus siglas en inglés *Simulated Annealing*).

2.2.1 Técnicas de optimización convencionales

2.2.2.1 Método de Taguchi

La contribución de Taguchi a la ingeniería de calidad (Kaker, 1985⁶⁴; Phadke, 1989⁶⁵; Ross, 1989⁶⁶) ha sido muy grande. El concepto de diseño robusto de Taguchi se basa en el diseño de un producto o de un proceso, de tal manera que su funcionamiento sea menos sensible a la variación debida a variables que no se pueden controlar o variables ruido, que son económicamente difíciles de controlar. El método de Taguchi es apreciado por ser de *distribución libre* y por el uso de arreglos ortogonales (Ross, 1989)⁶⁶. Proporciona una reducción considerable de tiempo y recursos necesarios para determinar los factores que influyen en las operaciones, con una mejora simultánea de calidad y costo de fabricación (Unal & Dean, 1991)⁶⁷.

La técnica de Taguchi para el diseño de parámetros ha sido aplicada con éxito a varios problemas de corte de metales por profesionistas e investigadores. Youssef, Beauchamp y Thomas (1994)⁶⁸ comparan y discuten los beneficios económicos del método de Taguchi y de los experimentos factoriales fraccionarios con respecto a la técnica completa de diseño factorial en operaciones de torneado. Lin (2002)⁶⁹ usa el método de Taguchi para la optimización en una operación de fresado de careado, y demuestra la eficacia del método de Taguchi para la optimización simultánea y la mejora de las características en el fresado. Singh, Shan, y Pradeep (2002)⁷⁰ ilustran el potencial del método de Taguchi para identificar los parámetros críticos en el proceso de remoción de material en un maquinado por abrasivos. Shaji & Radhakrisnan (2003)⁷¹ aplican el método de Taguchi en un proceso de pulido superficial, muestran el impacto del uso de grafito para reducir la generación de calor en las zonas de pulido. Manna and Bhattacharyya (2004)⁷² utilizan el método de Taguchi para determinar los parámetros de corte necesarios para alcanzar un mejor acabado superficial en una operación de torneado de aluminio y de materiales compuestos de matriz metálica con base de carburo de silicio.

A través de los años, el método de Taguchi ha sido criticado por varios investigadores (Box, 1985⁷³; Carlyle, Montgomery & Runger, 2000⁷⁴). Vale la pena mencionar las siguientes críticas:

- Los arreglos ortogonales sugeridos por Taguchi son limitados en cuanto a números, pueden fallar al trabajar con muchos aspectos que interactúan entre sí.

- Para reducir el número y el costo de los ensayos, el método de Taguchi propone una mejora a corto plazo que se puede aplicar una sola vez, eventualmente esto puede llevar a que la solución no resulte ser la óptima.

- El método de Taguchi pretende la optimización sin un modelo empírico o mecánico durante la experimentación. Esto cierra la posibilidad de conocer más a fondo el proceso (Gunter, 1988).

- El método de Taguchi para la optimización de problemas de múltiples objetivos, como muestra Phadke (1989), se basa puramente en conocimiento subjetivo del proceso y en el juicio sobre éste.

2.2.1.2 Metodología de superficie de respuesta

La Metodología de superficie de respuesta (Box & Wilson, 1951⁷⁵; Montgomery, 2001)⁷⁶ es una herramienta importante de diseño de experimentos, donde la relación entre la(s) respuesta(s) de un proceso con sus variables de entrada son mapeadas para alcanzar el objetivo de maximización o minimización de la respuesta. Es un conjunto de técnicas de DOE (de sus siglas en inglés *Design Of Experiment*) y métodos de optimización útiles para cualquier campo de ingeniería.

Muchos profesionistas e investigadores usan RSM en problemas de optimización de procesos de corte. Taramen (1974)⁷⁷ usa una técnica de gráfica de contorno para optimizar simultáneamente el desgaste de la herramienta, el acabado superficial, y la fuerza de la herramienta para una operación de torneado de acabado. Lee, Shin y Yang (1996)⁷⁸ emplean un algoritmo interactivo entre RSM y modelado matemático para solucionar un problema de optimización en una operación de torneado. Fuh y Chang (1997)⁷⁹ analizan el efecto del cambio en el material de la pieza de trabajo y cada parámetro de corte en varias operaciones de fresado periférico y modelan la exactitud dimensional mediante un modelo de segundo orden de RSM. El-Axir (2002)⁸⁰ utiliza RSM para modelar el efecto de los parámetros de maquinado sobre la distribución de esfuerzos residuales para cinco diferentes materiales en operaciones de torneado.

Aunque la RSM funciona muy bien en diversos problemas de optimización, hay algunas limitaciones inherentes en la técnica. Carlyle et al. (2000)⁸¹ prefieren la aplicación de un algoritmo matemático de búsqueda iterativa o de técnicas de búsqueda heurísticas o metaheurísticas sobre RSM, específicamente en funciones objetivo no lineales y multimodales. Afirman que estos tipos de problemas son extremadamente difíciles de solucionar por RSM, además de que la complejidad del problema aumenta por la presencia de múltiples objetivos. Del Castillo y Semple (2000)⁸² mencionan que aunque RSM trabaja bien cuando el número máximo de respuestas es tres, generalmente presenta un punto silla indefinido en un modelo de superficie de respuesta cuadrática con más de tres respuestas. La técnica RSM se basa en una serie de experimentos, y puede que no sean factibles o rentables para los fabricantes en muchas situaciones.

Además, la función objetivo o respuesta necesita ser continuamente derivable para la determinación de las condiciones óptimas de corte, lo que puede no ser el caso en muchos procesos físicos.

2.2.1.3 Técnicas de búsqueda iterativa matemática

Las técnicas de programación lineal, no lineal y dinámica (Hiller & Liebermann, 1999)⁸³ pueden describirse en términos de sus estructuras, procedimientos computacionales y los problemas decisión formulados como minimización o maximización de una función de varias variables con restricciones. Con esta técnica no hay necesidad de construir un modelo del proceso bajo consideración, ya que generalmente es reemplazado por un modelo matemático empírico que describe el proceso real.

En cualquier problema de LP de procesos de corte, la función objetivo y las ecuaciones de restricción son funciones lineales; el algoritmo más popular en LP es el simplex. Como los problemas de corte generalmente son complejos y no lineales en la naturaleza, las técnicas de LP no proporcionan una respuesta adecuada y pueden no ser apropiadas para muchos de esos problemas. Las funciones multimodales y las funciones de múltiple respuesta no lineales justifican el uso de las técnicas de NLP en este caso.

En cualquier formulación de un problema de optimización NLP, la función o por lo menos una de las restricciones no son lineales. Una combinación de condiciones de corte es óptima, si y solo si, se satisfacen todas las condiciones Karush-Kuhn-Tucker (Hiller & Liebermann, 1999)⁸³. La Programación por objetivo, introducida por Charner y Cooper (1963)⁸⁴, se usó anteriormente para solucionar muchos problemas NLP de múltiples objetivos.

La determinación de los parámetros óptimos de corte es un factor clave para alcanzar la eficiencia de la máquina o del proceso. Se han propuesto y usado eficazmente varias técnicas de programación matemática para alcanzar este objetivo. Hayers y Davis (1979)⁸⁵ proponen el uso de DP (siglas en inglés de *Direct Programming*, Programación Directa) para lograr obtener los parámetros óptimos de la máquina, cuando ocurre el cambio de herramienta entre pasadas en una operación de corte. Sekhon (1982)⁸⁶ propone un algoritmo de optimización basado en DP, para solucionar un problema de optimización de cuatro etapas de maquinado, donde las variables de la máquina se consideran discretas. Agapious (1992a, b & c)^{87,88,89} sugiere una técnica DP para trabajar con operaciones de maquinado simples y de múltiples pasadas. Tan y Creese (1995)²⁹ utilizan un método basado en LP para lograr los ajustes óptimos en una operación de torneado de múltiples pasadas. Prasad, Rao y Rao (1997)⁹⁰ combinan LP y GP (siglas en inglés de *Genetic Programming*, Programación Genética) para optimizar los parámetros en un torneado de múltiples pasadas. Chen, Lee, y Fang (1998)⁹¹ proponen un enfoque de IP (siglas en inglés de *Integer Programming*, Programación Entera) y DP para la reducción del tiempo de maquinado en una máquina Control Numérico

Aunque LP, NLP y DP funcionan muy bien en muchas situaciones, vale la pena mencionar algunos inconvenientes de estas técnicas:

(i) Las técnicas matemáticas de búsqueda iterativa se centran en ciertos aspectos específicos del maquinado (tales como fuerza de corte, temperatura y desgaste de la herramienta) y puede que no tomen en cuenta las complejidades globales del proceso, debido al gran número de variables interdependientes y sus relaciones estocásticas (Markos y otros, 1998)⁹².

(ii) La función respuesta multimodal y multiobjetivo debe ser continuamente derivable para lograr el punto estacionario óptimo mediante las técnicas NLP y DP, lo que puede ser una restricción en problemas de la vida real. Por otra parte, las técnicas heurísticas y metaheurísticas pueden proporcionar una alternativa casi óptima de las condiciones de corte, son rentables y razonablemente aceptables para la puesta en práctica por los fabricantes, en vez de la búsqueda de las condiciones óptimas de corte basadas en técnicas de LP, NLP o DP.

2.2.2 Técnicas no convencionales

Técnica de búsqueda heurística

La heurística proporciona maneras simples para indicar cuál, entre varias soluciones alternativas, parece ser la más eficaz para alcanzar una cierta meta. Consiste en una o varias reglas que buscan soluciones aceptables a un costo computacional admisible (Voß, 2001)⁹³. Las técnicas

de búsqueda heurísticas pueden ser muy útiles para los casos donde las técnicas de optimización convencionales no son convenientes. Profesionistas e investigadores prefieren alternativas de solución costeables cuasióptimas que soluciones óptimas al cien por ciento.

Técnicas de búsqueda de Meta-heurística

Aunque la búsqueda heurística puede ofrecer soluciones cuasióptimas, éstas son generalmente para problemas específicos (De Werra y Hertz, 1983)⁹⁴. Los investigadores sugieren varias alternativas para problemas heurísticos específicos, una de ellas es la llamada *estrategia maestra iterativa generalizada o metaheurística* (Glover, 1986⁹⁵; Glover & Laguna, 2002⁹⁶), que guía y modifica las soluciones heurísticas para producir otras soluciones, que normalmente se obtienen en una búsqueda de puntos óptimos locales. Como se ha divulgado en la literatura, hay tres tipos de algoritmos basados en búsquedas metaheurísticas aplicados al área de optimización de parámetros de corte. Éstos son *Algoritmo Genético (GA)*, *Recocido Simulado (SA)*, y *Búsqueda Tabú (TS)*. En estas técnicas no se necesitan derivadas y no se basan en la relación funcional entre la respuesta y la entrada para la búsqueda que hacen.

Algoritmo genético.

El funcionamiento de un GA (Holland, 1975⁹⁷; Goldberg, 2002⁹⁸; Deb, 2002⁹⁹), el cual se prefiere para problemas de optimización grandes y complejos de procesos de corte, se basa en tres operadores básicos que son *reproducción*, *cruciamiento* y *mutación*, para ofrecer una población de soluciones. El algoritmo crea una nueva población de soluciones a partir de una población aleatoria inicial, esto a través de un proceso iterativo que emplea la reproducción, el cruzamiento y la mutación. La selección, el cruzamiento y la mutación en la población inicial crea una nueva generación, la cual es evaluada con criterios definidos previamente. El procedimiento continúa considerando la población actual como población inicial hasta que se alcance el criterio de finalización. El GA es muy atractivo para problemas de optimización de uno o múltiples objetivos (Deb, 2002)⁹⁹, algunas de sus ventajas son:

(i) Puede examinar amplios espacios de exploración y su dirección de búsqueda es probabilística y no determinística, así se pueden evitar puntos locales óptimos.

(ii) Trabaja con una población de puntos de solución en vez de un solo punto de solución como las técnicas convencionales; proporciona múltiples soluciones cuasióptimas.

(iii) Tiene la capacidad de solucionar funciones multimodales y problemas de funciones con respuestas no lineales de múltiples objetivos; puede ser aplicado a funciones discretas y continuas.

Aunque la técnica de optimización basada en GA trabaje bien en muchas situaciones, vale la pena mencionar algunos defectos de ella:

(i) La convergencia del GA no siempre está asegurada.

(ii) No existe una regla universal para la elección apropiada de los parámetros del algoritmo, tales como el tamaño de la población, el número de generaciones que se evaluarán, la probabilidad de cruzamiento, de mutación y la longitud de la cadena.

(iii) El GA puede requerir un tiempo de ejecución significativo para obtener soluciones cuasióptimas y la velocidad de convergencia puede ser lenta. Además, la repetición de los resultados obtenidos por un GA con las mismas condiciones iniciales no se garantiza.

Búsqueda Tabú

Un algoritmo basado en búsqueda local, llamado *Búsqueda Tabú*, desarrollado por Glover (Glover, 1989¹⁰⁰, 1990¹⁰¹) genera su atracción debido a su gran flexibilidad y fácil implementación en problemas combinatorios de optimización.

El algoritmo TS comienza con un punto inicial que es posible solución (obtenido de una combinación al azar de variables del proceso), después se mueve gradualmente a un punto de solución mejor. Se genera una prueba con vectores en la vecindad del vector actual, el mejor vector dentro de la prueba se determina con base en una aproximación heurística. Se hace un movimiento del vector actual a un mejor vector que no está en la lista tabú, lo que proporciona valores mejorados de la función objetivo en un solo paso. Una lista tabú contiene un cierto número de los vectores usados. El mejor vector sustituye al vector más viejo de la lista tabú, y a los vectores que sobreviven en la lista se les da un estatus de activo, lo que reduce el riesgo de repetir el mismo vector.

Si bien Kolahan y Liang (1996)¹⁰², mientras exploraban el potencial de la técnica TS para la toma de múltiples decisiones simultáneas, intentaron reducir el costo del taladrado fijando algunos parámetros de la máquina, como velocidad de corte, recorrido de la herramienta, cambio y selección de herramientas para una operación de taladrado en un molde de inyección de plástico; no hay muchos reportes del uso de esta técnica para la optimización de parámetros en el proceso de corte de metales.

Aunque la TS se puede considerar una buena alternativa al GA o al SA para resolver problemas complejos de optimización dentro de una cantidad razonable de tiempo de cómputo, hay ciertas restricciones y suposiciones inherentes a la técnica. No se garantiza la convergencia del algoritmo TS para una función objetivo multimodal en un número finito de pasos, como en otras técnicas metaheurísticas. La elección del tamaño de la lista tabú siempre influye en la solución final del problema, pues una lista pequeña puede dar lugar a un mayor tiempo de cómputo.

Recocido simulado

La técnica SA (Kirkpatrick et al., 1983¹⁰³; Cerny, 1985¹⁰⁴), que se basa en el concepto de modelado y simulación de un sistema termodinámico, puede ser utilizada para solucionar problemas de optimización combinatoria. Esta técnica comienza con la selección al azar de un vector inicial de decisión, que cambia a uno nuevo que mejora el valor de la función objetivo. La probabilidad que haya un vector inferior (o un vector de que entregue peores valores de la función objetivo) disminuye conforme disminuye el valor de la “temperatura parámetro”, definida en el algoritmo; esto es análogo al enfriamiento en un proceso de recocido para lograr el estado cristalino perfecto.

Saravanan, Ashokan, y Sachithanandam (2001)¹⁰⁵ hicieron un estudio comparativo entre técnicas convencionales y no convencionales para optimización de torneado CNC, observaron que hay más flexibilidad en el algoritmo SA y en las técnicas basadas en GA sobre las técnicas convencionales.

En la literatura se reportan varias aplicaciones de algoritmos basados en SA para problemas de optimización de procesos de corte. Chen y Su (1998)¹⁰⁶ determinaron condiciones de corte cuasióptimas para una operación de torneado continuo de un perfil en CNC usando un algoritmo SA, dicen que el algoritmo entrega una solución heurística de alta calidad con recursos de cómputo razonables.

Las técnicas SA se pueden utilizar para solucionar problemas de optimización de corte en espacios de estado discreto o continuo. La naturaleza estocástica del algoritmo y los movimientos probabilísticamente guiados son dos de sus aspectos claves en caso de una función multimodal. Aunque el SA es apreciado por su simplicidad y eficacia, la convergencia del algoritmo puede ser seriamente afectada por los parámetros del plan de enfriamiento, no existen valores universales aceptables de los parámetros de éste para diferentes problemas de corte. Más aún, la repetición de soluciones cuasi óptimas bajo las mismas condiciones iniciales de corte no se garantiza.

2.3 Diseño de experimentos y método de Taguchi

Diseño de experimentos (DOE siglas en inglés de *Design Of Experiment*) es una técnica estadística introducida por Sir R. A. Fisher en Inglaterra, a principio de la década de los 20. Es usada para estudiar los efectos de múltiples variables simultáneamente.

El Dr. Genechi Taguchi es un científico japonés que ha pasado mucho tiempo de su vida profesional investigando formas para mejorar la calidad en la manufactura de los productos. El método de ingeniería de calidad que propuso usualmente se llama *Método de Taguchi* o *Enfoque de Taguchi*. Su propuesta es una nueva estrategia experimental en la cual utiliza una forma modificada y estandarizada de DOE. En otras palabras, el Método de Taguchi es una forma de DOE con principios de aplicación especiales.

Para hacer la técnica más fácil y sencilla de aplicar, Taguchi estandarizó el método de aplicación de DOE. Para llevar a cabo experimentos, él creó arreglos ortogonales especiales, cada uno de los cuales es usado para un cierto número de situaciones experimentales. Introdujo una nueva forma de analizar los resultados para cuando se quiere saber cuál es la solución que entrega la mejor calidad. Su propuesta del uso de la relación señal-ruido (S/N) para el análisis de resultados repetidos ayuda a los experimentadores a asegurar fácilmente un diseño que esté protegido (diseño robusto) contra la influencia de variables que no se pueden controlar.

Para analizar los resultados, Taguchi lleva a cabo cálculos estadísticos básicos tales como el promedio y el análisis de la varianza (ANOVA), pero los mezcla con una nueva propuesta para analizar los resultados basada en la desviación del objetivo en vez de valores absolutos.

En general, el Método de Taguchi es aplicable a cualquier situación que dependa de la influencia de muchos factores (variables, entradas, parámetros o ingredientes). Es una técnica que permite seleccionar científicamente la mejor opción cuando se enfrentan muchas posibilidades.

Todo tipo de industrias pueden utilizar el Método de Taguchi. Puede ser aplicado donde quiera que haya productos y procesos. Debe ser una habilidad esencial para todos los especialistas de manufactura y procesos. Todo proceso, incluyendo el maquinado, tratamiento térmico, fundición, moldeo, soldado, soldado fuerte, aglutinamiento, pintado, pegado y recubrimiento, es controlado por un número de factores. Todos estos pueden ser ajustados de manera precisa mediante un diseño de experimento adecuado.

El propósito de hacer experimentos es investigar y aprender. Ya sea que se quiera saber cómo un producto o proceso hace lo que hace o se quiera saber cómo ciertos factores afectan la salida. Los experimentos que generalmente se hacen y algunos términos empleados se describen a continuación:

Experimento de investigación. Se hacen experimentos cuando se está menos presionado por el tiempo de lo que se estaría si se estuviera en una investigación, o cuando se tiene la necesidad urgente de determinar qué causa el desempeño esperado o el problema. En tales experimentos se trata de identificar *factores* y determinar su influencia en el resultado. Se evalúa un diseño y se compara con otro.

El reto en los experimentos de investigación es cómo evaluar el desempeño, cómo definir un criterio de evaluación y cómo valorar el desempeño en general. Cuando se quiere comparar un producto con otro, sus desempeños pueden medirse en las unidades apropiadas. Pero cuando el desempeño de un grupo de productos se compara con otro grupo, se necesita una herramienta estadística apropiada para los desempeños medidos.

Aunque los experimentos se hacen usualmente con productos (o procesos) reales y herramientas representativas, no necesariamente tiene que ser así. Cuando se dispone de una simulación (basada en modelos matemáticos), puede ser un confiable sustituto a menor precio. La mayoría de los productos y procesos industriales que están sujetos a investigación tienen asociados muchos factores. Como no se dispone siempre de una simulación, hacer experimentos con los componentes físicos es una práctica común. Hacer experimentos para estudiar los efectos de todos los factores involucrados puede ser muy costoso. El objetivo es realizar el número mínimo de experimentos para obtener la mayor información.

Experimento demostrativo. Estos experimentos se llevan a cabo para confirmar los resultados (salidas, respuestas, etc.) de otros experimentos. Todas las pruebas de validación (o experimentos) que se hacen al final de un desarrollo ingenieril o científico antes de la producción, son de este tipo. Simplemente se evalúa el desempeño. No hay nada con qué comparar pues todas las muestras tienen el mismo diseño. Lo que se pregunta son cosas como: ¿es lo que se esperaba?, ¿cumple con las especificaciones?

Factor es sinónimo de variable, entrada, ingrediente, elemento. Los factores son los ingredientes que el sistema requiere para producir los objetivos deseados. Factor es cualquier cosa que se sospecha que tiene influencia en el desempeño del producto o proceso que se estudia. Es un elemento en la entrada del sistema o proceso. Es algo que se puede tocar, sentir, controlar o ajustar.

Sólo aquellos factores que se considera que tienen influencia directa en la salida del sistema y los que están incluidos en la investigación son considerados como factores en un estudio de DOE. Aquellos que no están incluidos en el estudio permanecen como componentes fijos del sistema. Por ejemplo, en un proceso de horneado de pan, los factores son harina, azúcar, mantequilla, levadura, etcétera.

Nivel es el valor o estatus en el que se encuentra un factor en los experimentos. Por ejemplo, si leche fuera un factor en el horneado de pan, una taza y dos tazas serían los dos *niveles* del *factor* leche.

Resultado. Un resultado es una medida del desempeño. La mayoría de los resultados se expresan en término cuantitativos y en unidades de medida. También hay situaciones en las que el resultado se expresa en términos cualitativos. Incluso si los resultados son cualitativos en la práctica de producción, para propósitos de análisis experimentales siempre pueden ser expresados en valores numéricos. Resultado es sinónimo de respuesta, que es el término usualmente empleado en el área estadística.

Característica de calidad. Mientras *resultado* expresa el desempeño en términos cuantitativos, no da un entendido de cuánto se alcanzó del objetivo deseado. Dependiendo de la conveniencia de los resultados, la Característica de Calidad puede ser *más grande mejor*, *más pequeña mejor* o *nominal es mejor*.

Más grande mejor. En este tipo se prefiere una magnitud mayor de la evaluación sobre las más pequeñas. Teóricamente, no hay límite superior en los resultados. En la práctica, se requiere de un límite superior para exactitud numérica. Para obtener consistencia, el desempeño promedio puede considerarse como el valor objetivo.

Más pequeño mejor. Aquí los resultados de magnitud menor se prefieren sobre los otros. El valor objetivo teórico es cero. El valor práctico del valor más bajo alcanzable se puede ajustar a un número. Para propósitos de comparación, se busca la menor desviación del valor objetivo.

Nominal es mejor. En este tipo de medida se desea siempre un valor fijo. Se llama valor objetivo o nominal al nivel fijo que se desea alcanzar. Para propósitos de comparación, se usa la desviación más pequeña de los resultados respecto al valor objetivo.

2.3.1 DOE usando arreglos ortogonales

En la mayoría de los procesos industriales, más de un factor controla la salida. Se necesitan experimentos de tamaño limitado que permitan examinar los factores en diferentes combinaciones, así como hacer mejores predicciones del comportamiento de los factores.

Para entender los conceptos de DOE, se asume que los factores y sus niveles son conocidos. Se emplea una notación alfabética para los factores (A, B, C, etc.) y sus niveles (a_1 , a_2 , b_1 , etc.) para describir las condiciones experimentales y las posibilidades de diferentes escenarios. Esto es, para investigar el factor A en dos niveles, un mínimo de dos experimentos serán necesarios, los cuales se escriben de forma condensada como A: a_1 y a_2 .

Supóngase que hay dos factores, A (niveles a_1 y a_2) y B (niveles b_1 y b_2) para ser estudiados juntos. Ya que cualquier valor de A puede ir con cualquier valor de B, existen cuatro posibilidades (experimento 1, experimento 2, etc.), las cuales se obtienen combinando los dos niveles de los factores como se muestra en la Figura 2.2. Similarmente, tres factores A, B y C estudiados cada uno en dos valores, requieren ocho experimentos:

	a1	a2	
b1	Experimento 1	Experimento 3	Factor A → a1 y a2
b2	Experimento 2	Experimento 4	Factor B → b1 y b2

Cuatro experimentos: a_1b_1 a_1b_2 a_2b_1 a_2b_2

Figura 2.2 Experimentos posibles con dos factores de dos niveles.¹⁰⁷

Los ocho experimentos, para tres factores en dos niveles cada uno, también pueden escribirse usando notaciones de 1 para el nivel 1 y 2 para el nivel 2 de los factores asignados a la columna, como se muestra en la Tabla 2.1. Este tipo de notación hace que la descripción de experimentos más grandes sea más sencilla. Leyendo una fila a la vez, los experimentos se describen así:

Experimento	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	1	2
3	1	2	1
4	1	2	2
5	2	1	1
6	2	1	2
7	2	2	1
8	2	2	2

Tabla 2.1 Descripción de experimentos usando notaciones de nivel.¹⁰⁷

Experimento 1: 1 1 1 ó $a_1b_1c_1$

Experimento 2: 1 1 2 ó $a_1b_1c_2$

En el lenguaje de DOE, las posibles combinaciones de los niveles de los factores son llamadas *combinaciones factoriales completas*. Dado un número de factores y sus niveles, el número total de posibles combinaciones es fácilmente determinado usando la fórmula de combinación:

$$\text{número total de combinaciones} = (\text{número de niveles})^{\text{número de factores}} \quad (2.1)$$

Cuando todos los factores son de dos niveles, el número total de combinaciones dependerá del número de factores:

$$2^2 = 4 \text{ para dos factores de dos niveles}$$

$$2^3 = 8 \text{ para tres factores de dos niveles}$$

Las condiciones experimentales cuando se trabaja con factores de tres y cuatro niveles pueden generarse similarmente. Por ejemplo:

1.- Dos factores (A y B) de tres niveles producirán 9 (3^2) combinaciones como se muestra:

Factores: $A (a_1, a_2, a_3)$ y $B (b_1, b_2, b_3)$

Combinaciones: a_1b_1 a_1b_2 a_1b_3

a_2b_1 a_2b_2 a_2b_3

a_3b_1 a_3b_2 a_3b_3

2.- Tres factores (C, D y E) de cuatro niveles producirán 64 (4^3) combinaciones como se muestra:

Factores: $C (c_1, c_2, c_3, c_4)$, $D (d_1, d_2, d_3, d_4)$ y $E (e_1, e_2, e_3, e_4)$

Combinaciones: $c_1d_1e_1$ $c_1d_1e_2$ $c_1d_1e_3$ $c_1d_1e_4$

$c_1d_2e_1$ $c_1d_2e_2$ $c_1d_2e_3$ $c_1d_2e_4$

$c_1d_3e_1$ $c_1d_3e_2$ $c_1d_3e_3$ $c_1d_3e_4$

.

.

$c_4d_4e_1$ $c_4d_4e_2$ $c_4d_4e_3$ $c_4d_4e_4$

Se puede observar claramente que el número de experimentos para cubrir todas las combinaciones posibles llega a ser muy elevado, incluso con un número limitado de factores. Para

Capítulo II. Técnicas de optimización de maquinado. 50

reducir el número de experimentos y obtener información valiosa sobre el proceso, Sir R. A. Fisher (Inglaterra 1890-1962) intentó utilizar el trabajo del matemático suizo Leonard Euler (1707 – 1783) con los cuadrados latinos (también conocidos como cuadrados Greco-Latinos, y después, arreglos ortogonales). Hoy día, el aprender la técnica experimental de Taguchi significa aprender la forma de usar los arreglos ortogonales propuestos por Taguchi.

La palabra *diseño* en *diseño de experimento* se refiere al plan que describe una combinación de factores incluidos en el estudio. Esto significa que cuando un experimento es diseñado, se sabrá el número y el cómo se llevarán a cabo los experimentos. En concreto, el diseño de experimentos responde a dos preguntas: ¿cuántos experimentos hacer? y ¿de qué manera realizarlos?

Para ello, se han creado un número de arreglos ortogonales, para lidiar con los experimentos más comunes en la industria: para factores de dos, tres y cuatro niveles. Los arreglos ortogonales han sido creados para ayudar a llevar a cabo los experimentos. Un número de arreglos está disponible para este propósito. Cada arreglo puede ser usado para llevar a cabo varios experimentos. El arreglo ortogonal más pequeño es un L-4, el cual puede ser usado para diseñar experimentos para estudiar factores de 2 ó 3 niveles, como se muestra en la Tabla 2.2.

Experimento	Columna		
	1	2	3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tabla 2.2 Arreglo ortogonal L-4 (2^3)¹⁰⁷

Los arreglos ortogonales se denotan por la notación L (L de cuadrados latinos) con un subíndice o un guión (L₄ o L-4, ambos son comunes). El subíndice se refiere al número de filas en la tabla, las cuales indican las combinaciones que el diseño recomienda. Por ejemplo, un L-4 tendrá 4 filas, un L-8 tendrá 8 filas, un L-n tendrá *n* filas. Además de esta notación de carácter, los arreglos contienen algunas notaciones numéricas, las cuales indican el número de factores involucrados en las combinaciones factoriales completas. La designación (2^3) con L-4 tiene estos significados. Primero, $2^3 = 8$ indica que el número de combinaciones es 8. En segunda indica que el arreglo puede ser usado para diseñar un experimento de hasta tres factores (exponente 3 en 2^3) de dos (base 2 en 2^3) niveles. Dado que el número de factores con los que puede ser designado un experimento depende del número de columnas en el arreglo, el exponente 3 en 2^3 también indica el número de columnas en el arreglo.

Un arreglo ortogonal L-9 (3^4) (Tabla 2.3) significaría lo siguiente: plantea 9 experimentos (9 en L-9), existen 81 posibles combinaciones ($3^4 = 81$), son 4 factores (4 en 3^4) con 3 niveles (3 en 3^4) y existen 4 columnas en el arreglo. Así pues:

Ensayo	Columnas			
	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tabla 2.3 Arreglo L-9 (3^4)¹⁰⁷

2.3.2 Propiedades de los arreglos ortogonales

La palabra *ortogonal* significa, en términos del arreglo, que las columnas están *balanceadas*. La palabra *balanceadas* tiene dos significados. Primero, cada columna está balanceada consigo misma. Esto significa que dentro de una columna, hay igual número de niveles. Por ejemplo, en todas las columnas de L-4, hay dos 1's y dos 2's. El segundo significado es que cualesquiera dos columnas en los arreglos también están balanceadas. Considérese la propiedad de ortogonalidad entre las columnas 1 y 2 del arreglo L-8 (Tabla 2.4). Dado que estas dos columnas tienen 1 y 2, pueden tener cuatro combinaciones distintas. Cuando dos columnas de dos niveles están balanceadas, cada una de estas combinaciones se presentará en iguales ocasiones (Tabla 2.5).

Experimento	Columna						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla 2.4 Arreglo ortogonal L-8 (2^7)¹⁰⁷

Se pueden hacer observaciones generales, no relacionadas con la ortogonalidad, leyendo el arreglo a lo largo de las columnas. (Ver Tablas 2.3 y 2.4). La primera fila de todos los arreglos tiene puros 1's. También, puede verse que no hay alguna fila que contenga puros 2's, 3's ó 4's.

Combinación	Columna	
	1	2
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Tabla 2.5 Columnas balanceadas¹⁰⁷

2.3.3 Arreglos ortogonales usuales y sus propiedades especiales

Los arreglos permiten diseñar experimentos sobre situaciones que ocurren frecuentemente en la industria. La lista de los arreglos más comunes incluye cinco arreglos para factores de dos niveles, tres para factores de tres niveles y dos para factores de cuatro niveles (Tabla 2.6)

Arreglo	Uso previsto (experimentos con)	
L-4 (2^3) L-8 (2^7) L-12 (2^{11}) L-16 (2^{15}) L-32 (2^{31})	3 factores de dos niveles 7 factores de dos niveles 11 factores de dos niveles 15 factores de dos niveles 31 factores de dos niveles	Arreglos de 2 niveles
L-9 (2^4) L-18 ($2^1, 3^7$) ^a L-27 (3^{13})	4 factores de tres niveles 1 factor de dos niveles y 7 de tres niveles 13 factores de tres niveles	Arreglos de 3 niveles
L-16 (4^{15}) modificado L-32 ($2^1, 4^9$) ^a modificado	5 factores de cuatro niveles 1 factor de un nivel y 9 de cuatro niveles	Arreglos de 4 niveles

Tabla 2.6 Arreglos ortogonales más usados para diseñar experimentos¹⁰⁷

El uso de arreglos ortogonales para diseñar experimentos significa seguir tres sencillos pasos:

Primer paso: seleccionar el arreglo ortogonal. No hay una fórmula matemática exacta para la selección del arreglo. Se tiene que saber que se busca y hacer la selección intuitivamente.

Segundo paso: asignar factores a las columnas. Cualquier factor puede ser asignado a cualquier columna.

Tercer paso: describir los experimentos. Una vez que los factores están asignados a las columnas, los experimentos individuales pueden describirse fácilmente, ya que cada fila describe uno de ellos (Tabla 2.7).

Ensayo	Factor		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	2	1	2
4	2	2	1

Tabla 2.7 Arreglo Ortogonal con 3 factores de dos niveles¹⁰⁷

Experimento 1: 1 1 1 o $a_1 \ b_1 \ c_1$

Experimento 2: 1 2 2 o $a_1 \ b_2 \ c_2$

Experimento 3: 2 1 2 o $a_2 \ b_1 \ c_2$

Experimento 4: 2 2 1 o $a_2 \ b_2 \ c_1$

Se presentó un vistazo general de las técnicas de optimización que pueden emplearse en procesos de corte y se hizo especial énfasis en el método de Taguchi. Este último método es el empleado en el caso de estudio, se eligió sobre los otros por ser, de acuerdo a la literatura, una técnica convencional que entrega soluciones óptimas. Además, al ser una técnica de DOE, la implementación se da de manera más práctica. La aplicación a fondo se describe en el siguiente capítulo.

Capítulo III. Desarrollo Experimental

Como ya se dijo anteriormente, el fresado es un proceso de arranque de viruta. En él están presentes muchas variables tales como avance, velocidad de corte, profundidad de corte, espesor de viruta, diámetro útil del cortador, uso de refrigerante, etcétera. Así pues, la salida del proceso, que en este caso es la pieza maquinada, depende de los diferentes factores (variables) que se mencionan.

Si bien, realizar un experimento en el que se pudieran controlar todas estas variables sería posible, el tamaño de éste sería monumental. Y si además de diseñar el experimento se requiriera maquinar cada una de las combinaciones, entonces se tornaría en una tarea muy laboriosa, inviable y costosa.

El método de Taguchi, a diferencia de las combinaciones factoriales completas, no requiere realizar todas las combinaciones posibles para obtener la información que describa el proceso. Basta con usar el arreglo ortogonal que se adecúe a las necesidades requeridas y a través de éste se puede obtener el comportamiento del proceso.

A continuación se muestra un diagrama (Figura 3.1) y un mapa de procesos (Figura 3.2) que ilustran lo que se llevó a cabo:



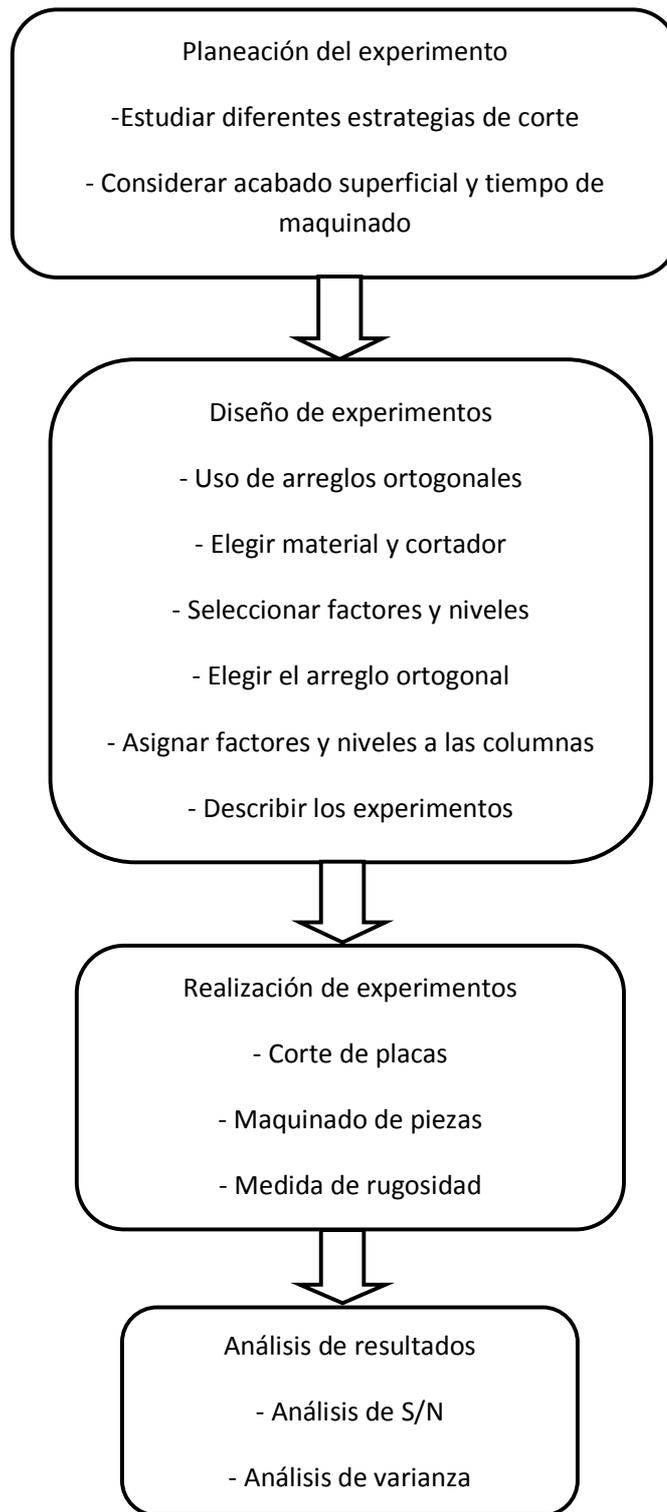


Figura 3.1 Diagrama del proceso

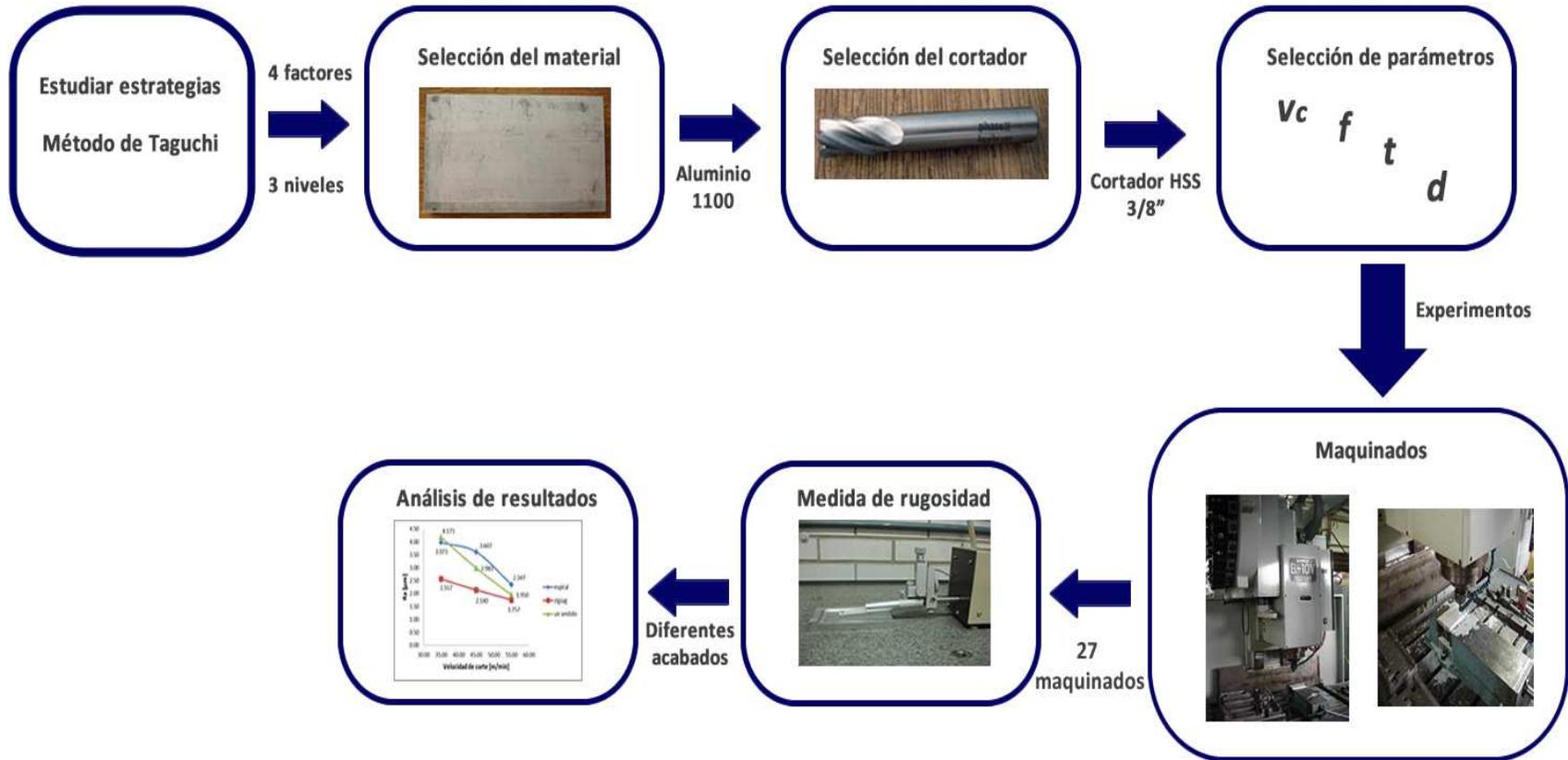


Figura 3.2 Mapa del proceso

3.1 Selección del arreglo ortogonal y de las variables del proceso

El caso en estudio es el desempeño de tres diferentes estrategias de corte en el proceso de fresado: espiral, zigzag (escalera) y un sentido. Para esto, se necesitan diseñar los experimentos que proporcionen la información del comportamiento de cada estrategia.

Hay muchas variables involucradas en el proceso de fresado que influyen en la salida de éste, como se dijo anteriormente. Para que una variable califique como factor debe ser una variable de entrada, no una de salida o un resultado.

De las variables disponibles en el caso de estudio, hay que seleccionar sólo algunas de éstas. En este caso, se decidió elegir las condiciones de corte más importantes, aquellas que, de antemano, es sabido que afectan de manera importante tanto el tiempo del maquinado, como el acabado de la pieza final. Es así que avance (f), velocidad de corte (v_c), profundidad de corte por pasada (t) y diámetro útil del cortador (d) son las variables (factores, en términos de lenguaje de Taguchi) que se usarán.

Una vez que se han elegido los factores, el siguiente paso es determinar cuántos niveles de los factores son necesarios. El uso de muchos niveles en los factores usualmente es costoso. Hay muy pocas ocasiones en las que se necesitan emplear factores con cuatro niveles. Usualmente, los resultados de estudios con tres niveles establecerán claramente si el factor se comporta linealmente o no. Sólo cuando se tengan estudios previos o una fuerte convicción que aliente la idea de que el factor tiene un comportamiento sinusoidal dentro del rango de los niveles seleccionados, se debe insistir en tener niveles con cuatro factores. Otras ocasiones donde se pueden estudiar factores con cuatro niveles es cuando el tiempo o número de experimentos no es una restricción.

En el caso de estudio se decidió trabajar con factores de tres niveles. En caso de haber elegido cuatro niveles, las simulaciones en el software empleado no hubiesen sido costosas o laboriosas, pero el número de maquinados se hubiera elevado considerablemente. Ya que de haber elegido cuatro niveles para cada factor, se hubieran tenido que realizar 48 muestras físicas, lo que resultaba en un costo mayor tanto de material como de tiempo. Al elegir sólo tres niveles, el número de muestras físicas fue de 27.

Finalmente, dado que se tenían tanto el número de factores como de niveles determinados, se hizo la selección del arreglo. De acuerdo a la literatura sobre Taguchi, se dice que para elegir el arreglo ortogonal adecuado no hay una fórmula exacta, sino que se recomienda escoger el menor que pueda hacer el trabajo. Es así que, viendo las opciones disponibles, se decidió elegir el arreglo L-9 (3^4) que a continuación se muestra:

Columnas				
Ensayo	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Tabla 3.1 Arreglo L-9 (3^4)¹⁰⁷

Una vez seleccionado el arreglo ortogonal, se asignan los factores a cada columna. No existe ningún tipo de cuidado al asignar éstos en cada una de ellas. De acuerdo al arreglo mostrado arriba, los factores fueron asignados de la siguiente manera:

1. Velocidad de corte (v_c) 2. Avance (f) 3. Corte por pasada (t) 4. Diámetro útil del cortador (d).

Ya que se asignaron los factores a las columnas, el siguiente paso es darle los niveles a cada uno. Pero esto no se hace de manera arbitraria, se tienen que analizar los niveles que se emplearán.

3.2 Selección de las condiciones de corte para el maquinado

De acuerdo a los cuatro factores seleccionados, velocidad de corte, avance, profundidad de corte y diámetro útil del cortador, se tienen que determinar los niveles para cada uno de ellos.

El material en el cual se maquinaron las muestras físicas es uno muy común y comercial, aluminio de la serie 1100 (Tabla 3.2)

Aluminio 1100				
Composición química: Si + Fe = 0.95%, Cu = 0.12%, Al = 99.0% min.				
Propiedad	Valor en sistema internacional		Valor en sistema inglés	
Densidad	2.71×10^3	$\frac{kg}{m^3}$	169	$\frac{lb}{ft^3}$
Módulo de Young	69	<i>GPa</i>	10000	<i>ksi</i>
Coefficiente de dilatación lineal (20°C)	23.6×10^{-6}	$^{\circ}C^{-1}$	13.1×10^{-6}	$\frac{in}{(in * ^{\circ}F)}$
Calor específico	904	$\frac{J}{(kg * K)}$	0.216	$\frac{BTU}{(lb * ^{\circ}F)}$
Conductividad térmica	222	$\frac{W}{(m * K)}$	1540	$\frac{BTU * in}{(hr * ft^2 * ^{\circ}F)}$
Resistencia eléctrica	2.99×10^{-8}	<i>Ohm*m</i>	2.99×10^{-6}	<i>Ohm * cm</i>
Esfuerzo máximo	90	<i>MPa</i>	13000	<i>psi</i>
Esfuerzo de fluencia	34.5	<i>MPa</i>	5000	<i>psi</i>
Elongación	35 (espesor 1.59 mm)	%	35 (espesor 0.0625 in)	%
	45 (diámetro 12.7 mm)	%	45 (diámetro 0.500 in)	%
Esfuerzo cortante	62	<i>MPa</i>	9000	<i>psi</i>
Esfuerzo de fatiga # de ciclos 5×10^8	34.5	<i>MPa</i>	5000	<i>psi</i>
Dureza	23	<i>HB</i>	23	<i>HB</i>
Temperatura de enfriamiento rápido	343	$^{\circ}C$	650	$^{\circ}F$

Tabla 3.2 Propiedades de aleación de aluminio 1100¹⁰⁹

Una vez seleccionado el material, se consultó el manual *Machining data handbook / Comp. by the technical staff of the machinability data center* para ver los parámetros recomendados y con base en ellos, ajustarse a las restricciones que se establecieron anteriormente (Tabla 3.3).

Material	Dureza BHN	Profundidad de corte	Acero rápido					Grado del material
			Velocidad	Avance				
				in/diente				
				mm/diente				
			Diámetro del cortador					
in	fpm	3/8 in	1/2 in	3/4 in	1-2 in	AISI		
mm	mm/min	10mm	12mm	18mm	25-50mm	ISO		
Aleaciones de aluminio	30 a 80	0.020	800	0.003	0.004	0.005	0.007	M2,
EC 3005 6066		0.060	600	0.004	0.006	0.008	0.010	M3,
1060 4032 6070		diám./4	500	0.003	0.004	0.006	0.008	M7
1100 5005 6101		diám./2	400	0.002	0.003	0.005	0.006	
1145 5050 6151								
1175 5052 6253								
1235 5056 6262		0.5	245	0.075	0.102	0.13	0.18	S4,
2011 5083 6463		1.5	185	0.102	0.15	0.20	0.25	S5,
2014 5086 6951		diám./4	150	0.075	0.102	0.15	0.20	S2
2017 5154 7001		diám./2	120	0.050	0.075	0.13	0.15	
2018 5252 7004								
2021 5254 7005								
2024 5454 7005								
2025 5456 7039								

Tabla 3.3 Parámetros recomendados para aluminio 1100¹⁰⁸

El primer factor (parámetro) que se calculó fue la velocidad de corte. Se partió de la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\text{velocidad}}{\text{circunferencia}} = \frac{\text{velocidad}}{\pi * \text{diámetro}} = \frac{v_c}{\pi * d} \quad (3.1)$$

donde

N velocidad de rotación [RPM]
 v_c velocidad de corte [mm/min]
 d diámetro del cortador [mm]

El cortador que se empleó fue uno de medida estándar, un cortador recto HSS de 3/8" con 4 filos. Se eligió esta medida ya que el cortador haría las suficientes pasadas para dejar clara la estrategia empleada dado el ancho de corte de la cavidad, que sería de 2 in; este diámetro de cortador se adecuaba de buena manera a las medidas de la cavidad que se iba maquinando, no dejaría esquinas con radios muy grandes, ni tampoco se necesitaría mucho tiempo para terminar el maquinado, como hubiera sucedido si se empleaba un cortador de diámetro menor. Dadas las

restricciones de RPM de la máquina, se decidió trabajar a un máximo de 2000 RPM, pues en caso de haber elegido las velocidades de corte recomendadas para este tipo de aluminio, se necesitaban velocidades de giro del husillo muy elevadas.

Es así que, con los datos que se tenían $d = 9.525 [mm]$ y $N = 2000 [RPM]$ se pudo calcular la velocidad de corte con base en la ecuación 1.1:

$$v_c = (\pi)(9.525 \times 10^{-3} [m]) \left(2000 \frac{rev}{min} \right) \approx 60 \left[\frac{m}{min} \right]$$

La velocidad de corte máxima, de acuerdo a los cálculos, hubiese sido de 60 [m/min]. Sin embargo, para reducir riesgos de ruptura de herramienta, se tomó 55 [m/min] como la velocidad de corte máxima. Este valor corresponde al tercer nivel del factor velocidad de corte. Se dijo anteriormente que se emplearían tres niveles para cada factor. La variación de los niveles se eligió para que fuera proporcional, entonces los otros dos niveles fueron 45 [m/min] y 35 [m/min].

El siguiente factor (parámetro) para el que se eligieron los niveles fue la profundidad de corte. Para este caso se usó una regla que recomienda usar como máximo 1/3 del diámetro del cortador, con el fin de evitar fractura por flexión de la herramienta de corte.

$$t_{cmax} = \frac{1}{3}d \quad (3.2)$$

donde

t_{cmax} profundidad de corte máxima [mm]
 d diámetro del cortador [mm]

Como se dijo anteriormente, se usó un cortador de 3/8", esto es 9.525 [mm], así pues:

$$t_{m\acute{a}x} = \frac{1}{3}(9.525 [mm]) = 3.175 [mm]$$

Este valor correspondía al corte máximo que se podía realizar con el cortador de estas características, pero se decidió reducir este valor a 2.4 [mm] para no trabajar al máximo. Este valor se encuentra todavía dentro de los valores recomendados para esta aleación de aluminio consultados en el manual. Además, se decidió a priori, que la profundidad de las cavidades fuese de 3 [mm], pues se trabajaría con cavidades para fines de esta investigación. Como el corte se

efectuará en tres niveles de profundidad, se tuvo que dividir de manera equitativa. Quedando entonces los tres niveles de 0.8 [mm], 1.6 [mm] y 2.4 [mm].

Asimismo, el otro factor (parámetro) para el que se eligieron los niveles fue el avance. La ecuación que modela este parámetro es:

$$f = f_z z N \quad (3.3)$$

donde

f avance [mm/min]

f_z el avance por diente [mm/diente]

z número de filos del cortador [diente]

N velocidad de rotación [RPM]

Para elegir el avance máximo con el que trabajaría la máquina se emplearon como datos 2000 revoluciones por minuto, 0.075 [mm] para el avance por diente y 4 filos. Así pues, el avance máximo se calculó de la siguiente manera:

$$f = (0.075 \text{ [mm]})(4) \left(2000 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) = 600 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

Teniendo ese valor como el máximo a emplear, los otros dos niveles se seleccionaron disminuyendo de manera proporcional el valor máximo. Así pues, esos niveles fueron $500 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$ y $600 \left[\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$

Finalmente, el último factor para el que se determinaron los niveles fue el de diámetro útil del cortador, que es el porcentaje del diámetro del cortador que participa en un corte. Recomendaciones en literatura aconsejan que debe ser de 75% a 80% del diámetro del cortador. Para este caso se tomaron los valores de 70%, 75% y 80%.

Hasta el momento, se ha descrito la manera en que se eligieron los niveles para cada uno de los factores (parámetros). A continuación se presenta una tabla dónde se muestran los factores con sus respectivos niveles.

Factores	Niveles		
	1	2	3
Velocidad de corte $\left[\frac{m}{min}\right]$	35	45	55
Avance $\left[\frac{mm}{min}\right]$	400	500	600
Profundidad de corte $[mm]$	0.8	1.6	2.4
Diámetro útil [%]	70	75	80

Tabla 3.4 Factores y niveles para el arreglo ortogonal

3.3 Descripción de los experimentos

A continuación se presenta el arreglo L-9 (3^4) de cuatro factores con tres niveles, con los datos para el caso en estudio.

Experimento	Velocidad de corte $v_c \left[\frac{m}{min}\right]$	Avance $f \left[\frac{mm}{min}\right]$	Profundidad de corte $t [mm]$	Diámetro útil $d [%]$
1	35	400	0.8	70
2	35	500	1.6	75
3	35	600	2.4	80
4	45	400	1.6	80
5	45	500	2.4	70
6	45	600	0.8	75
7	55	400	2.4	75
8	55	500	0.8	80
9	55	600	1.6	70

Tabla 3.5 Arreglo ortogonal L-9 (3^4) con factores y niveles

Entonces, los experimentos quedan de la siguiente manera:

Experimento 1: $v_c1 f1 t1 d1$

O sea, el primer experimento tiene la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte y el diámetro útil del cortador, todos en su primer nivel.

- Experimento 2: $v_c1 f2 t2 d2$
- Experimento 3: $v_c1 f3 t3 d3$
- Experimento 4: $v_c2 f1 t2 d3$
- Experimento 5: $v_c2 f2 t3 d1$
- Experimento 6: $v_c2 f3 t1 d2$
- Experimento 7: $v_c3 f1 t3 d2$
- Experimento 8: $v_c3 f2 t1 d3$
- Experimento 9: $v_c3 f3 t2 d1$

Cada uno de los nueve experimentos descritos se realizó con una diferente estrategia de corte. Las tres estrategias de corte o trayectorias de herramienta que se emplearon fueron: espiral (Figura 3.3), zigzag o escalera (Figura 3.4) y un sentido (Figura 3.5).

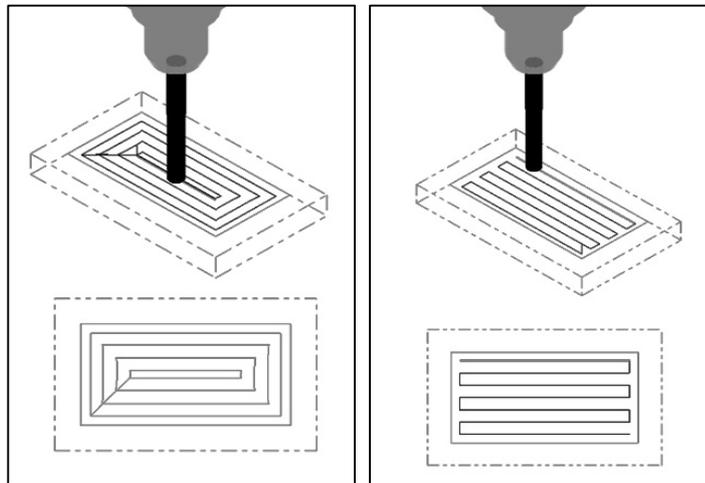


Figura 3.3
Estrategia de corte en espiral.

Figura 3.4
Estrategia de corte en zigzag.

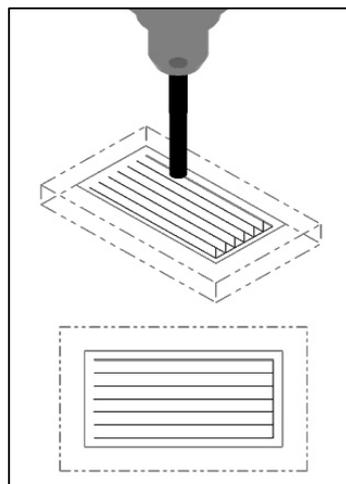


Figura 3.5 Estrategia de corte en un sentido

3.4 Simulación en Mastercam

Se utilizó el programa Mastercam X4 (13.0.3.31) para realizar tanto las simulaciones de los maquinados como para obtener el código de control numérico. El software se configuró para trabajar con el sistema métrico.

Lo primero que se realizó fue un *sketch* (Figura 3.6) de la cavidad que se iba a maquinar en la placa de aluminio, cuyas dimensiones fueron 101.6 [mm] x 50.8 [mm] (4 [in] x 2 [in]).

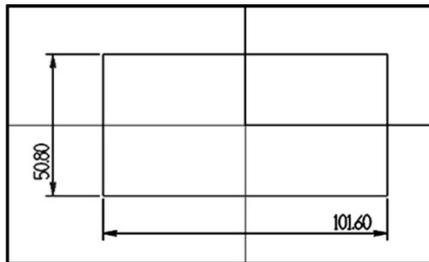


Figura 3.6 Sketch de la cavidad.

Posteriormente, desde el submenú *Stock Setup* (Figura 3.7) se dieron las medidas de la cavidad: 127.0 [mm] x 76.2 [mm] x 12.7 [mm]; y su forma, rectangular. También se escogió el lugar del cero pieza, que en este caso fue el centro y la parte superior de la placa.

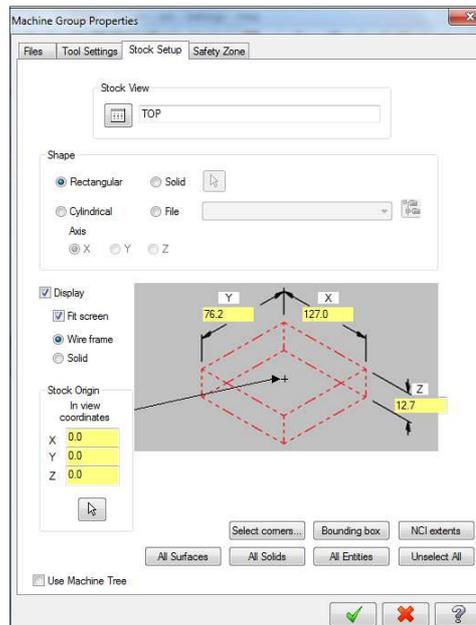


Figura 3.7 Configuración de la pestaña *Stock Set Up*

En el submenú *Tool Settings* se seleccionó la opción *User Defined* para poder usar parámetros de corte personalizados. Los submenús *Files* y *Safety Zone* se dejaron con las opciones predeterminadas.

Posteriormente, para iniciar a trabajar sobre lo que sería el maquinado, en la pestaña *Machine Type* del menú superior del programa se seleccionó *Mill* y posteriormente *Default*.

Después, en el menú *Toolpaths* se escogió la opción *Pocket*, se dio el nombre deseado al archivo y se seleccionó la cadena (Figura 3.8) que funcionó como el contorno de la cavidad maquinada.

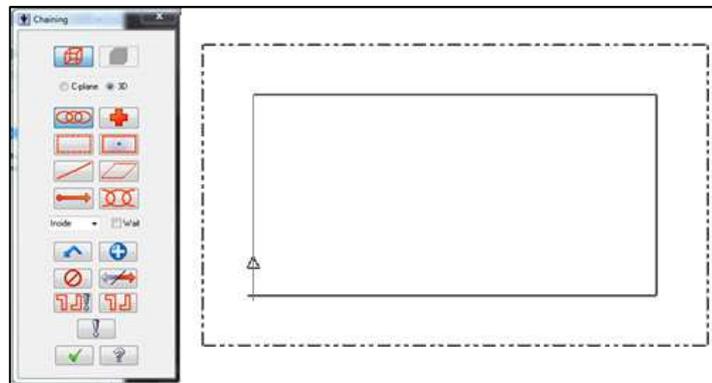


Figura 3.8 Selección de la cadena que es la geometría de la cavidad.

Después de seleccionada la cadena, se desplegó el menú *2D Toolpaths Pocket* en el que se configuró todo lo referente al maquinado.

Primero, desde la sección *Tool* (Figura 3.9) se creó la herramienta con la que se realizarían los maquinados. Fue del tipo cortador recto (end mill) de acero rápido (HSS) con 4 filos. Tuvo las siguientes medidas:

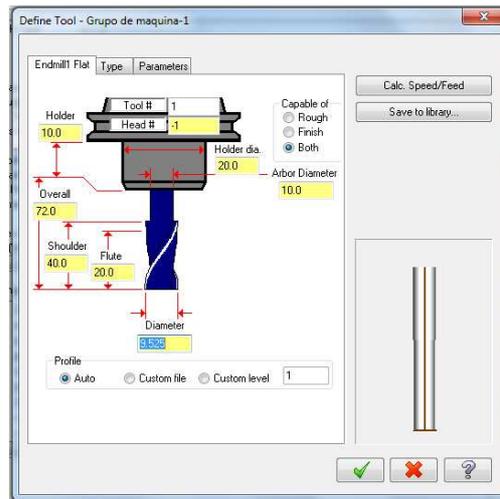
Diámetro: 9.525 [mm]

Filo: 20 [mm]

Zanco: 40 [mm]

Largo total: 72[mm]

Figura 3.9 Características de la herramienta



En la pestaña de *Parameters*, que aparece cuando se crea una herramienta, se colocaron valores de forma manual, pues si se usa la opción automática de calcular avances y velocidades, el programa tomaba parámetros muy altos. Tanto la tasa de penetración y de retorno fueron iguales al avance, 120 [mm/min]. La velocidad de giro de la herramienta se fijó inicialmente en 1200 RPM y el tipo de giro en sentido horario.

En la sección de *Tool* (Figura 3.10), se ingresaron los valores de *feed* y de *CS*, que corresponden al avance [mm/min] y a la velocidad de corte [m/min] respectivamente. Los otros parámetros como *FPT* o *Spindle Speed* se dejaron de la manera en que aparecen, pues éstos dependen de los otros dos mencionados anteriormente. Dependiendo del ensayo que se estuviera simulando, estos parámetros son los de la Tabla 3.4.

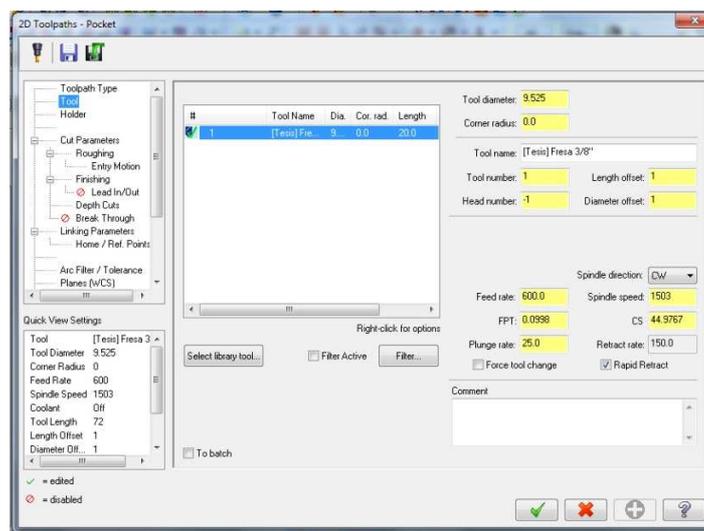


Figura 3.10 Configuración en el submenú de *tool*

En la sección de *Cut Parameters* se escogió la opción paralela de maquinado (*climb*). El tipo de cavidad, estándar; y el lugar de la compensación, desde la punta.

En la subsección de *Roughing* se eligió el tipo de maquinado (Figura 3.11). De acuerdo al ensayo que se estuviera simulando, se cambiaba entre un sentido (*one way*), zigzag y espiral (*constant overlap spiral*). También, el valor de diámetro útil del cortador (*stepover percentage*) se cambió de acuerdo al del experimento simulado. En la parte de *Entry Motion* se desactivó el tipo de entrada del cortador al material.

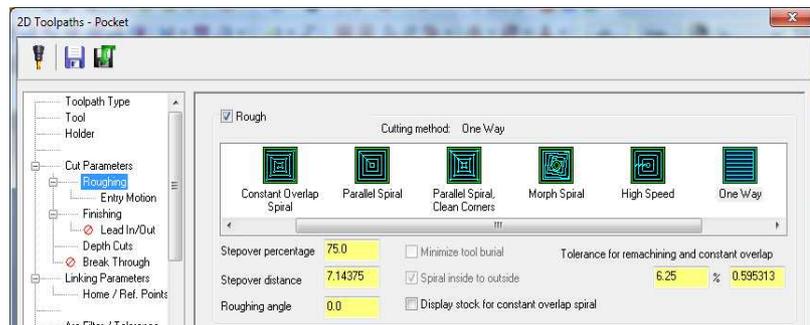


Figura 3.11 Configuración del submenú *Roughing*

En la siguiente subsección, *Finishing*, se desactivó la opción de *Finish*, pues se decidió no usar una pasada de acabado, ya que eso se reflejaría en el acabado dejado por cada estrategia de corte.

En la subsección de *Depth Cuts* (3.12) se especificó el corte por pasada que haría el cortador en el material. Aquí, una vez más, varió dependiendo del experimento que se estuviera llevando a cabo. Se activó la opción de mantener la herramienta abajo, para que la herramienta no se retrajera en cada corte.

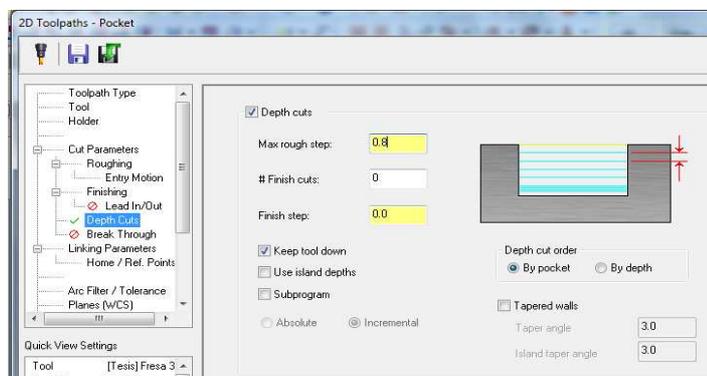


Figura 3.12 Configuración del submenú *Depth Cuts*

Finalmente, en la sección de *Linking Parameters* (Figura 3.13), se establecieron las distancias de la herramienta respecto a la pieza de trabajo, y como en otras secciones, dependía del ensayo. La profundidad total de la cavidad, 3 [mm], se declaró en esta parte. La distancia de alejamiento (*clearance*) es la que se retira la herramienta respecto del material al inicio y al final del proceso, se puso un valor de 50 [mm].

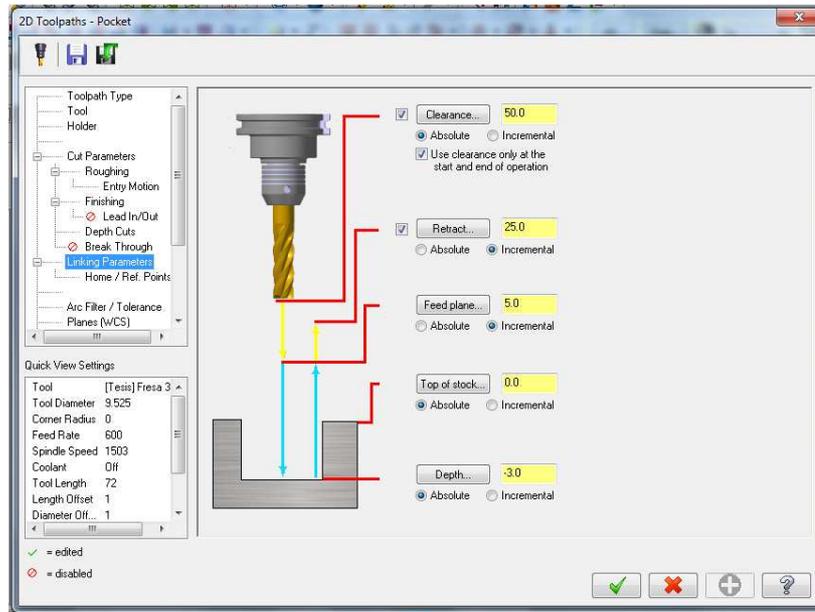


Figura 3.13 Configuración del submenú *Linking parameters*

La distancia de retracción indica qué distancia se alejara la herramienta del material entre cada una de las pasadas. Se estableció un valor de 25 [mm]. La distancia Feed Plane se refiere el movimiento rápido que hace la herramienta cuando cambia de tipo de avance al hacer un arco, se dejó en 5 [mm].

Con esto se finalizó la configuración del menú 2D Toolpaths Pocket. Faltaba solamente verificar la operación (*Verify Selected Operations*, Figura 3.14) para saber si no habría colisiones o errores en los parámetros establecidos. Para terminar, se simuló el maquinado (*backplot*, Figura 3.15). Este menú muestra el tiempo total de maquinado.

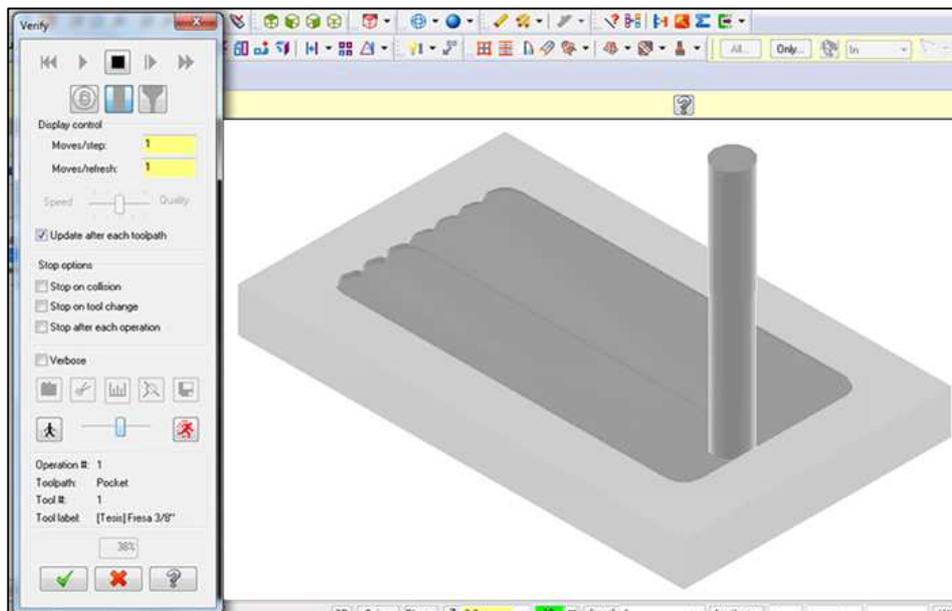


Figura 3.14 Opción verify ejecutándose.

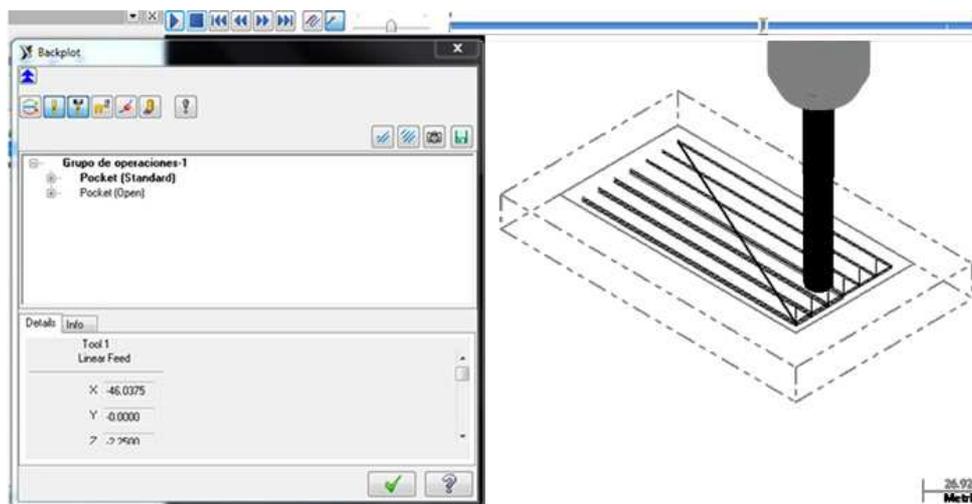


Figura 3.15 Opción Backplot ejecutándose.

Una vez que se comprobó que el maquinado no presentara problemas, mediante la opción de *Post Selected Operations* se obtuvo el programa de control numérico que se emplearía para maquinar las piezas.

3.5 Maquinado de piezas

La máquina que se empleó fue una modelo *Mill Master B-10 V Shizuoka* (Figura 3.16) Esta máquina tiene las siguientes características: Modelo B-10V, torreta automática de 24 herramientas, controlador Fanuc System 11M, con una mesa de trabajo de (X, Y, Z) 40" x 20" x 20" y una capacidad máxima de carga de 997.903 [kg] (2200 [lb]).



Figura 3.16 Mill Master B-10 V Shizuoka

Ya se tenían las placas donde se realizarían los maquinados, que como se dijo anteriormente, éstas tienen medidas de 127 [mm] x 76.2 [mm] x 12.7 [mm] (5"x3"x ½"). También, se tenían ya listas las 3 herramientas de 3/8" de HSS, para cada una de las diferentes estrategias.

Una vez que se montó la prensa en la que se sujetarían las placas, se estableció el cero máquina con la ayuda de un reloj palpador (Figura 3.17). Una vez hecho eso, se fijó la pieza que se iba a maquinar, se colocó la herramienta y se compensó la altura de ésta en Z. Posteriormente, se conectó la computadora portátil a la máquina, esta comunicación se hizo a través del puerto serial. Una vez recibido el programa en la máquina, se realizó el maquinado.



Figura 3.17 Reloj palpador

Se maquinaron las nueve piezas correspondientes a cada una de las tres estrategias de corte (Figuras 3.18 y 3.19). Cuando se terminaba con una de las estrategias, se cambiaba la herramienta por una nueva.



Figura 3.18 Proceso de maquinado



Figura 3.19 Proceso de maquinado

Al final se obtuvieron veintisiete piezas maquinadas, nueve correspondían a la estrategia en espiral (Figura 3.20), nueve a zigzag (Figura 3.21) y nueve a un sentido (Figura 3.22).



Figura 3.20 Cavity maquinada con estrategia zigzag

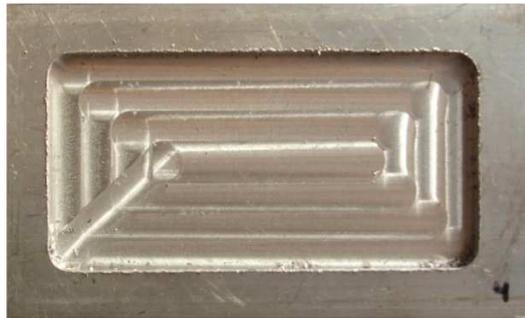


Figura 3.21 Cavity maquinada con estrategia espiral



Figura 3.22 Cavity maquinada con estrategia un sentido

3.6 Medida de rugosidad superficial

Sin importar el método de producción, todas las superficies tienen características que, en conjunto, se conocen como textura superficial. Aunque la descripción de textura superficial como

propiedad geométrica es compleja, se han establecido ciertos lineamientos para identificarla en términos de cantidades bien definidas y cuantificables.

-Las imperfecciones o defectos son irregularidades aleatorias, como raspaduras, grietas, orificios, depresiones, costuras, desgarramientos o inclusiones.

-La direccionalidad o sesgo es la dirección del modelo superficial predominante, por lo general perceptible a simple vista.

-La rugosidad se define como las desviaciones irregulares en pequeña escala esparcidas estrechamente; se expresa en términos de su peso, anchura y distancia a lo largo de la superficie.

-La ondulación es la desviación recurrente de una superficie plana; se mide y describe en términos del espacio entre las crestas adyacentes de las ondas (anchura de ondulación) y la altura entre las crestas y valles de las ondas (altura de ondulación).

Por lo general, la rugosidad superficial se describe mediante dos métodos. El valor medio aritmético (Ra) se basa en el esquema de una superficie rugosa, como se muestra en la figura 3.23. Se define como:

$$Ra = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (3.4)$$

donde

a, b, c, \dots , ordenadas, todas en valores absolutos
 n es la cantidad de lecturas.

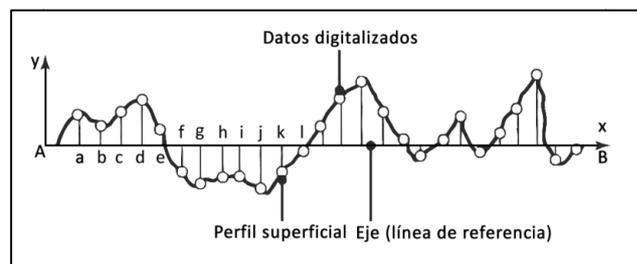


Figura 3.23 Coordenadas utilizadas para medir rugosidad Ra¹⁵

La rugosidad R_z es la media aritmética de las alturas Z_i a lo largo de la longitud de muestreo (Figura 3.24).

El parámetro R_{\max} se refiere a la altura Z_i más grande en la longitud total de medición.

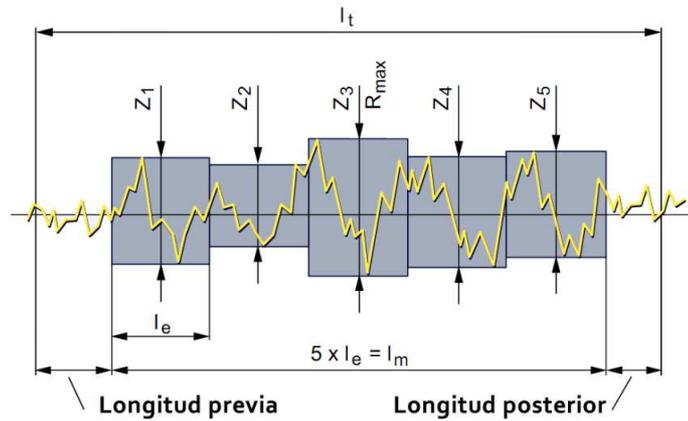


Figura 3.24 Alturas Z_i para rugosidad R_z y R_{\max}

Una vez que se contaban con las veintisiete cavidades maquinadas, cada una con diferentes parámetros, el siguiente paso fue medir la rugosidad superficial de ellas. Para esto se emplearon los equipos Mitutoyo Surftest 402 Surface Roughness Tester (Figura 3.25) y Mitutoyo Surftest Analyzer 178 Series (Figura 3.26), proporcionados por la Facultad de Ingeniería.



Figura 3.25 Equipo Mitutoyo Surftest 402



Figura 3.26 Equipo Mitutoyo SurfTest Analyzer

Dado que el brazo del rugosímetro no tiene mucho desplazamiento en el eje Z, se tuvieron que cortar las placas en uno de sus lados, para así permitir que la punta del palpador pudiera tocar la superficie de la cavidad.

Una vez montado el equipo, la placa se colocó sobre una mesa de marmol, perfectamente plana, que disminuye errores en la medición. El rugosímetro se configuró para que la longitud de la una medida fuese de 0.8 [mm], y que ésta se repitiera en 5 ocasiones; además para que nos entregara los valores de Ra, Rz y Rmáx. Contando ya con el equipo y las placas listas, se midieron las rugosidades superficiales de cada una (Figura 3.27).



Figura 3.27 Medida de rugosidad superficial

A continuación se presenta una tabla (Tabla 3.6) con los resultados de rugosidad superficial obtenidos:

	Espiral			Zigzag			Un sentido		
	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax. [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax. [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Rmax. [μm]
Experimento 1	3.1	18.0	23.0	1.3	7.2	7.8	4.6	22.4	24.2
Experimento 2	3.52	14.6	14.9	3.47	12.6	13.6	3.62	13.8	14.4
Experimento 3	5.3	28.4	32.0	2.9	14.8	16.0	4.3	34.0	37.2
Experimento 4	5.4	26.6	28.6	2.1	9.8	11.4	3.7	19.4	22.2
Experimento 5	3.75	14.5	15.3	3.25	12.2	12.5	3.3	13.2	13.6
Experimento 6	1.67	8.0	9.2	1.07	6.8	7.5	1.95	11.5	12.5
Experimento 7	1.87	9.0	9.3	1.05	6.9	7.5	1.20	6.4	6.9
Experimento 8	2.77	10.7	11.4	2.90	11.4	11.8	3.20	12.1	13.1
Experimento 9	2.4	14.0	14.4	1.32	9.3	10.2	1.45	9.7	10.2

Tabla 3.6 Rugosidad superficial de las placas maquinadas

Con los datos que se muestran en esta tabla se realizaron dos análisis que se describen en el siguiente capítulo.

Capítulo IV. Resultados

La forma tradicional de manejar resultados de muchas muestras por ensayo realizado ha sido mediante el promedio de los resultados del ensayo, y así calcular el efecto de los factores. Aunque el uso de promedios es común, es un poco incorrecto cuando se busca regularidad más que promedio.

Considérese el siguiente ejemplo:

Proceso I: 7, 9 y 11 [V]; promedio = 9 [V]

Proceso II: 8, 9.5, 9, 8.5 y 10 [V]; promedio = 9 [V]

Si sólo se atienden los promedios, los dos procesos parecen iguales. Es cuando se revisan los datos y se compara la dispersión o la desviación estándar que podemos tener información acerca de sus variaciones. Y es así que, desde el punto de vista de la variación, el segundo proceso es el deseable.

Es claro que, por el ejemplo, el promedio solo nunca es una medida adecuada cuando se quieren comparar dos conjuntos de datos. Si la variación tiene que considerarse, el uso del promedio es engañoso. Entonces tiene que emplearse una medida que incluya el promedio y la desviación estándar. La desviación cuadrada promedio de los resultados satisface estas características.

Taguchi ha adoptado *consistencia del comportamiento* como una definición generalizada de la calidad. Para medir el comportamiento de las muestras de una población en términos de su consistencia, se ha definido una cantidad llamada desviación cuadrada promedio (*MSD*, siglas en inglés de *mean-squared deviation*).

Si $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ son n puntos (resultados), la MSD puede calcularse como (Figura 4.1):

$$MSD = \frac{\sum(Y_i - Y_0)^2}{n} = \frac{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 + \dots}{n} \quad (4.1)$$

donde

MSD desviación cuadrada promedio

Y_i resultados
 n numero de resultados

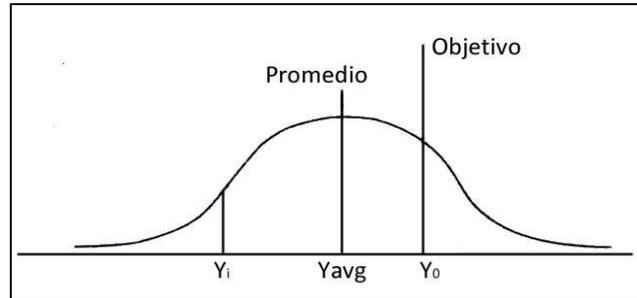


Figura 4.1 Desviación cuadrada promedio para cualquier tipo de distribución¹⁰⁷

Definición del MSD para las tres características de calidad.

El concepto de valor objetivo no aplica en los casos donde la evaluación del resultado tiene características de calidad más grandes o más pequeñas. En estos casos la MSD puede tratarse como la desviación con respecto al origen (objetivo cero). Al igual que en las desviaciones, en la MSD es deseable una cantidad pequeña en las tres características de calidad; en el caso de la característica de calidad mayor, se emplea el inverso de las desviaciones cuadradas, como se muestra.

$$\text{Nominal: } MSD = \frac{(Y_1 - Y_0)^2 + (Y_2 - Y_0)^2 + (Y_3 - Y_0)^2 + \dots + (Y_n - Y_0)^2}{n} \quad (4.2)$$

$$\text{Más pequeño mejor: } MSD = \frac{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2}{n} \quad (4.3)$$

$$\text{Más grande: } MSD = \frac{1/Y_1^2 + 1/Y_2^2 + 1/Y_3^2 + \dots + 1/Y_n^2}{n} \quad (4.4)$$

Criterios recomendados para el análisis

La transformación de los resultados en una escala logarítmica antes del análisis es una práctica común en la experimentación ingenieril. Muchos datos son graficados en *log vs log* o *log vs escala natural* para hacer que información muy dispersa se muestre en una gráfica y hacer que sea lineal. La gráfica lineal, desde luego, es altamente deseable, porque ofrece la posibilidad de formar conclusiones por extrapolación e interpolación de resultados.

Taguchi recomienda ampliamente el uso de la *tasa señal-ruido* (*S/N*, siglas en inglés de *Signal-Noise*, Señal de Ruido), la cual es expresada como una transformación logarítmica de la MSD, como un criterio de análisis de resultados experimentales. Una forma simple de la *S/N* se define multiplicando el log de la MSD por -10:

$$S/N = -10 \log_{10} MSD \quad (4.5)$$

donde

S/N relación señal ruido [dB]

MSD desviación cuadrada promedio

El multiplicador 10 es un factor de escala. Como tal, su magnitud (10, 20, 100, etc.) es arbitraria y no tiene efecto en las conclusiones que se deriven del resultado. El signo negativo se aplica a propósito para asegurar que el *S/N* se incremente cuando la MSD disminuya. Para todas las características de calidad de los resultados originales, se desean valores menores de la MSD y mayores de la *S/N*. Las unidades que se emplean para la *S/N* son los decibeles, [dB].

La tasa *S/N* es una de las mayores contribuciones del Dr. Taguchi a la ingeniería de calidad. Frecuentemente se escribe como *S/N* o se representa con la letra griega η . Como una medida de determinar la robustez, el *S/N* es un componente esencial del diseño de parámetros. La relevancia de la ecuación tasa *S/N* está ligada a interpretar la señal como la habilidad del proceso para construir un buen producto, o que el producto se desempeñe correctamente. Aplicando exitosamente este concepto a la experimentación, podemos determinar los niveles de los factores que pueden producir el mejor desempeño de un proceso o producto y a la vez minimizar el efecto de lo que no podemos.

4.1 Análisis *S/N*

El diseño del experimento consistió en variar cuatro factores (parámetros) que fueron avance (*f*), velocidad de corte (*v_c*), profundidad de corte por pasada (*t*) y diámetro útil del cortador (*d*). Cada uno de estos parámetros tenía tres posibles niveles. Con base en los resultados de rugosidad *Ra* (es aceptado que la medida que describe la rugosidad es el parámetro *Ra*) obtenidos que se muestran en la Tabla 3.6 se realizó un análisis *S/N* para cada uno de los niveles de los parámetros. Se eligió la característica de calidad *más pequeño mejor*, puesto que la rugosidad era el resultado por analizar, y cuánto más baja fuera, mejor.

Entonces, la ecuación que se empleó fue la 4.5, donde MSD en este caso es la forma 4.3.

Puede quedar escrita como:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2}{n} \right)$$

Sólo se presentan cálculos de las primeras tres S/N correspondientes a la velocidad de corte de la estrategia de corte en espiral. Los siguientes se realizaron de la misma manera y solamente se presentan los resultados.

Velocidad de corte v_c de $35 \left[\frac{m}{min} \right]$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{(3.1)^2 + (3.52)^2 + (5.3)^2}{3} \right) = -12.226 [dB]$$

Velocidad de corte v_c de $45 \left[\frac{m}{min} \right]$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{(5.4)^2 + (3.75)^2 + (1.67)^2}{3} \right) = -11.85 [dB]$$

Velocidad de corte v_c de $55 \left[\frac{m}{min} \right]$

$$S/N = -10 \log \left(\frac{(1.87)^2 + (2.77)^2 + (2.4)^2}{3} \right) = -7.51 [dB]$$

A continuación se presentan tres tablas que reúnen los cálculos de S/N para las tres estrategias de corte: estrategia en espiral (Tabla 4.1), estrategia en zigzag (Tabla 4.2) y estrategia en un sentido (Tabla 4.3).

Parámetro \ Nivel	1	2	3
$v_c \left[\frac{m}{min} \right]$	-12.226	-11.857	-7.515
$f \left[\frac{mm}{min} \right]$	-11.488	-10.559	-10.868
$t [mm]$	-8.254	-11.978	-11.823
$d [\%]$	-9.917	-7.941	-13.352

Tabla 4.1 Resultados de S/N para la estrategia de corte en espiral

Parámetro \ Nivel	1	2	3
$v_c \left[\frac{m}{min} \right]$	-8.680	-7.301	-5.742
$f \left[\frac{mm}{min} \right]$	-3.803	-10.144	-5.758
$t [mm]$	-5.738	-7.827	-8.255
$d [\%]$	-6.688	-6.778	-8.498

Tabla 4.2 Resultados de S/N para la estrategia de corte en zigzag

Parámetro \ Nivel	1	2	3
$v_c \left[\frac{m}{min} \right]$	-12.451	-9.759	-6.622
$f \left[\frac{mm}{min} \right]$	-10.826	-10.573	-9.101
$t [mm]$	-10.694	-9.837	-10.117
$d [\%]$	-10.563	-7.864	-11.504

Tabla 4.3 Resultados de S/N para la estrategia de corte en un sentido

En seguida se muestran las gráficas de todos los S/N calculados para cada una de las estrategias de corte.

Tasas S/N para estrategia en espiral (Figuras 4.2 - 4.5)

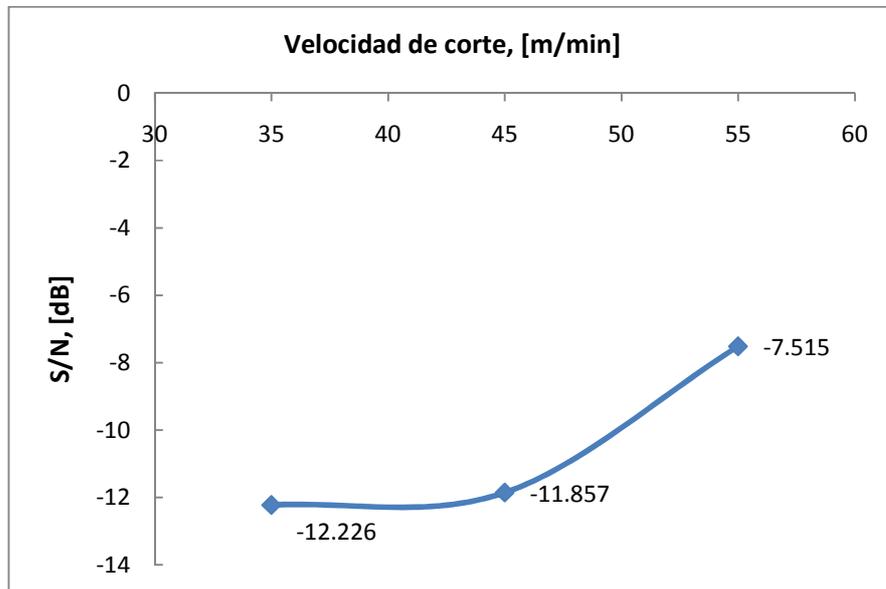


Figura 4.2 S/N velocidad de corte para estrategia en espiral

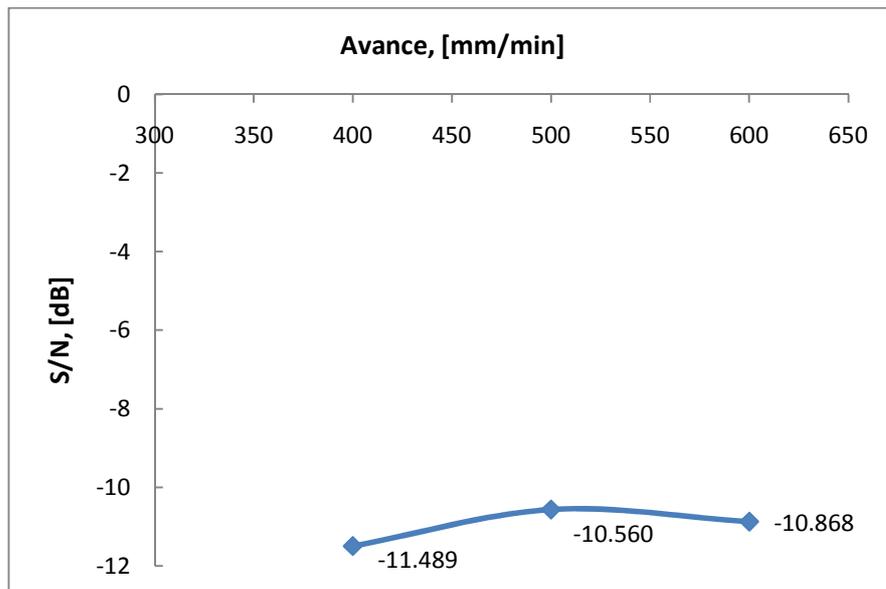


Figura 4.3 S/N avance para estrategia en espiral

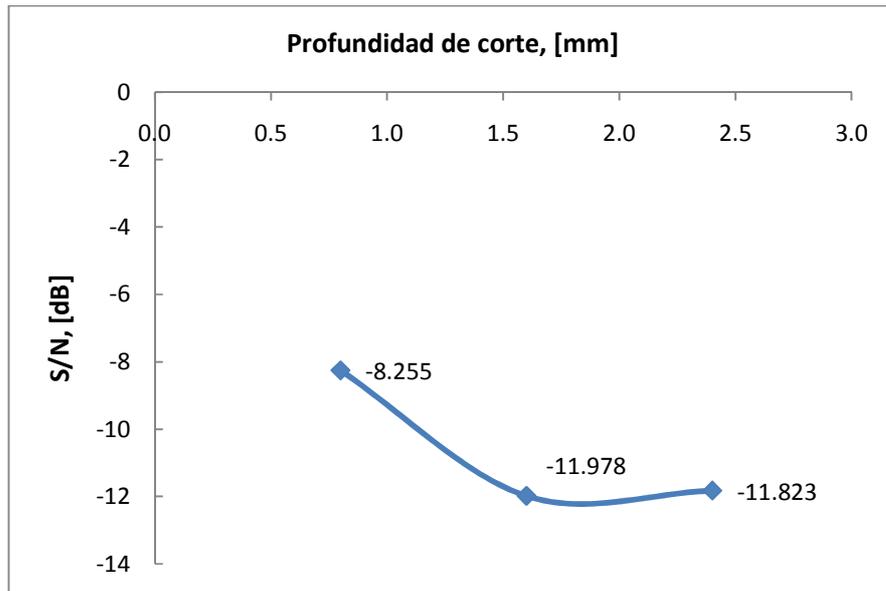


Figura 4.4 S/N profundidad de corte para estrategia en espiral

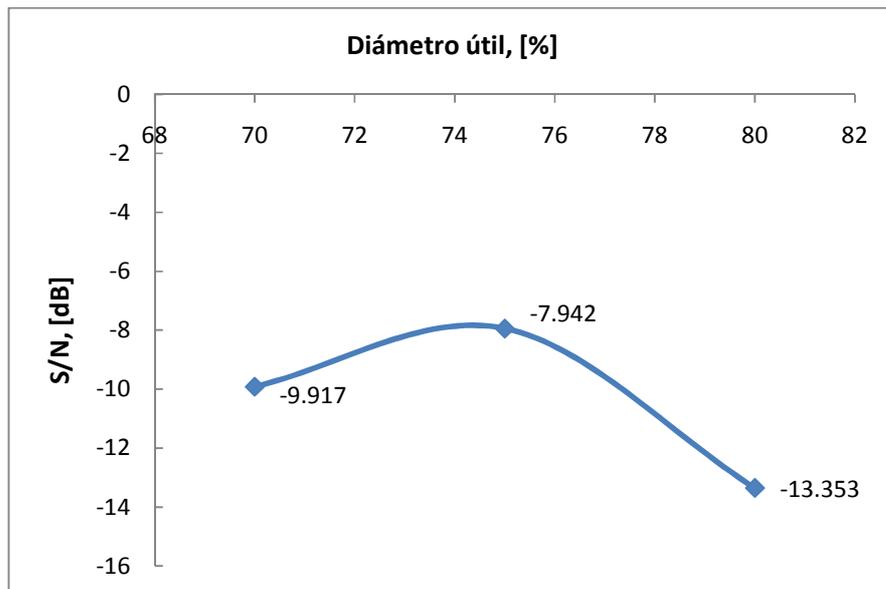


Figura 4.5 S/N diámetro útil para estrategia en espiral

Tasas S/N para estrategia en zigzag (Figuras 4.6 - 4.9)

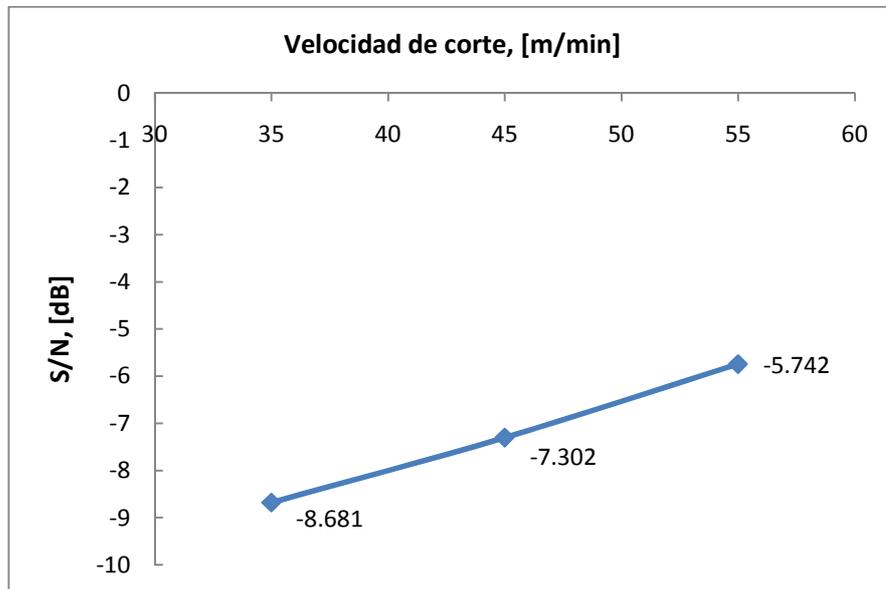


Figura 4.6 S/N velocidad de corte para estrategia en zigzag

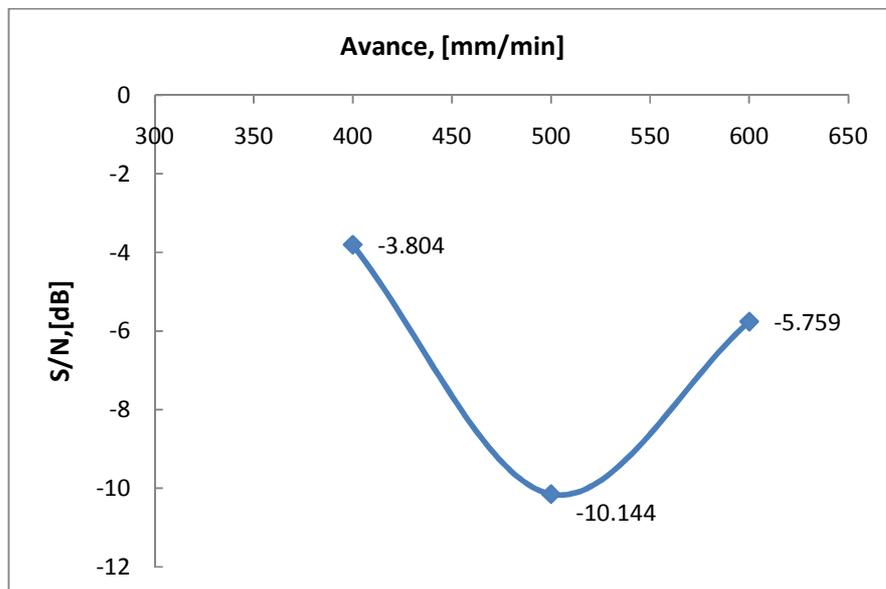


Figura 4.7 S/N avance para estrategia en zigzag

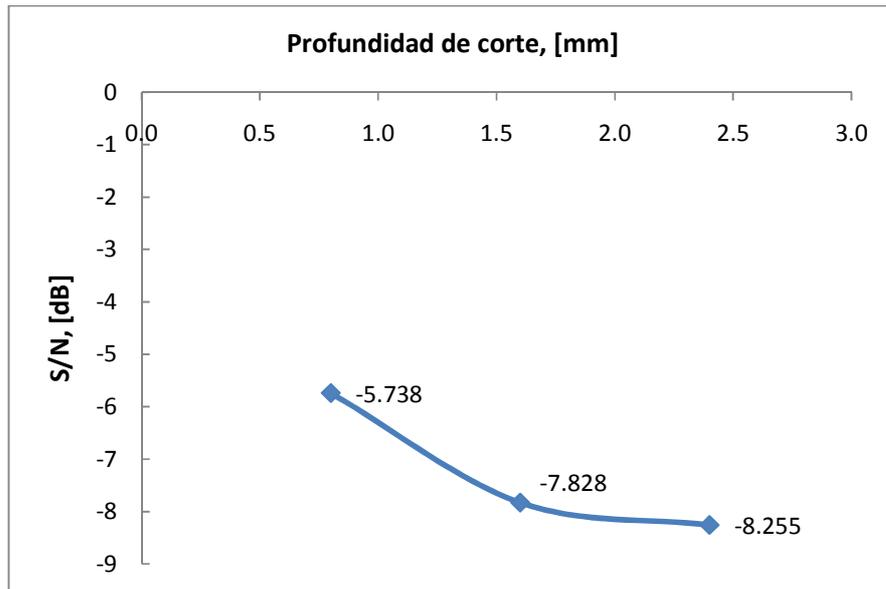


Figura 4.8 S/N profundidad de corte para estrategia en zigzag

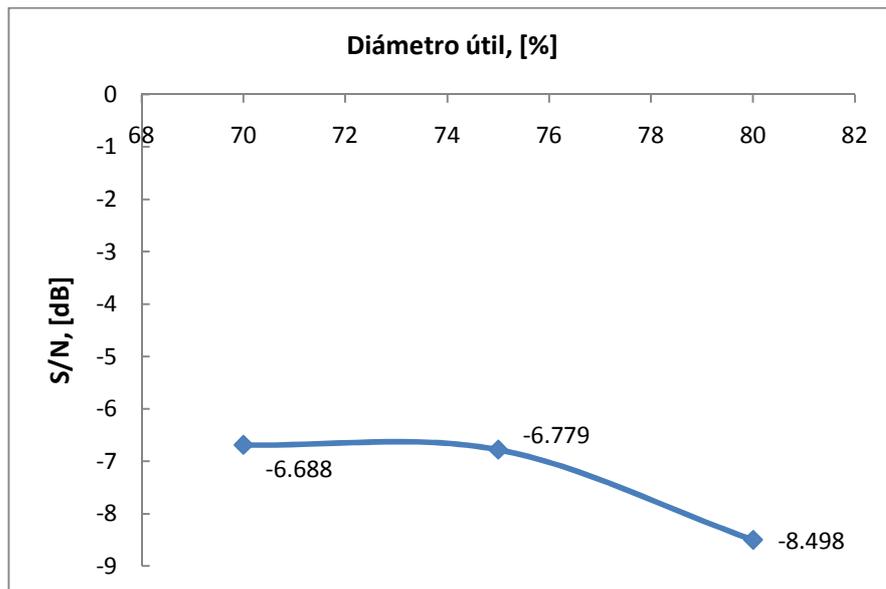


Figura 4.9 S/N diámetro útil para estrategia en zigzag

Tasas S/N para estrategia en un sentido (Figuras 4.10 - 4.13)

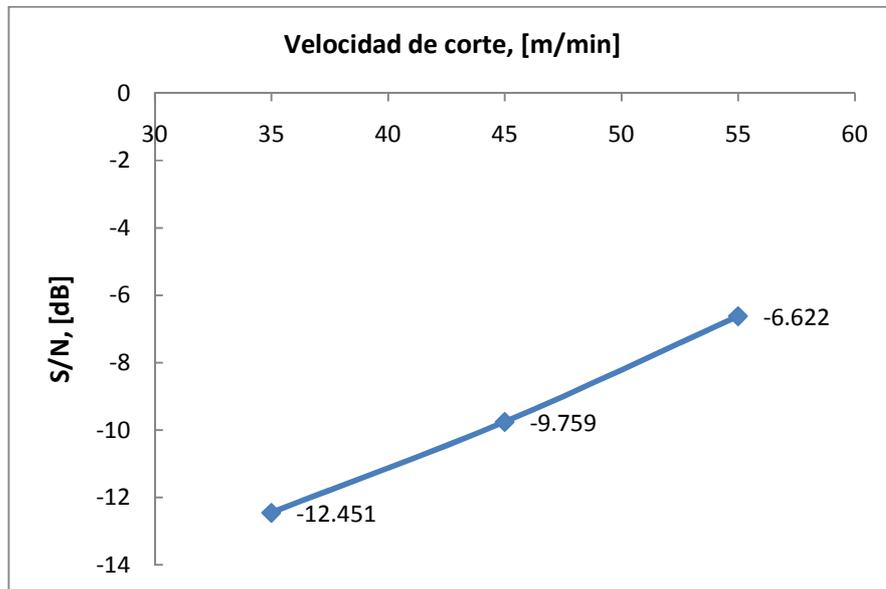


Figura 4.10 S/N velocidad de corte para estrategia en un sentido

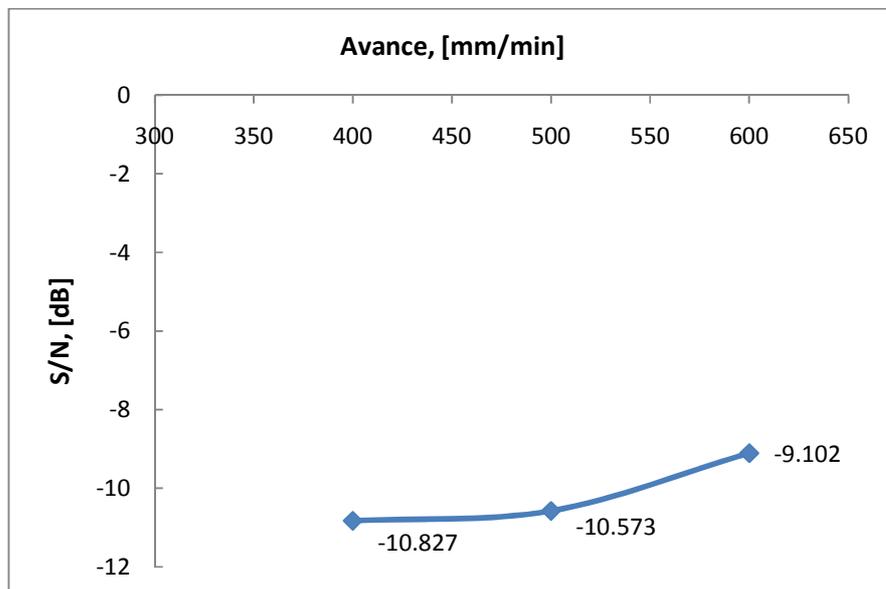


Figura 4.11 S/N avance para estrategia en un sentido

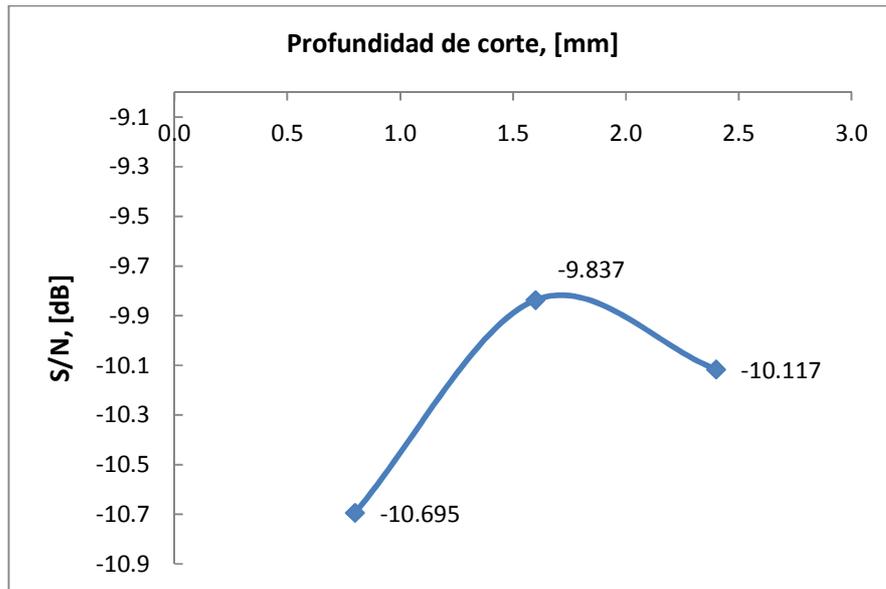


Figura 4.12 S/N profundidad de corte para estrategia en un sentido

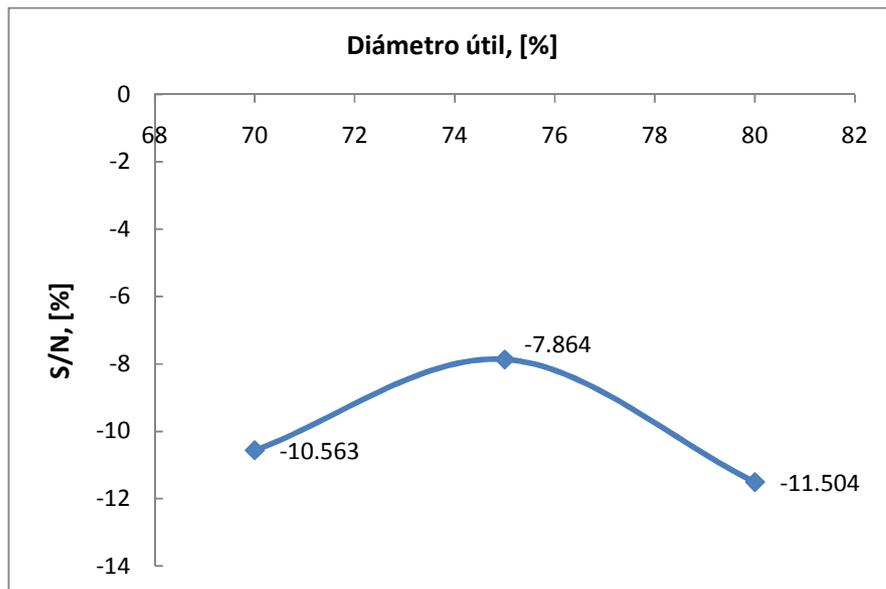


Figura 4.13 S/N diámetro útil para estrategia en un sentido

Una vez que se calcularon las tasas S/N y se graficaron éstas, se pudo saber qué niveles eran los óptimos para cada una de las estrategias. Esto porque, como se dijo antes, el mayor S/N representa el mejor nivel para el parámetro en cuestión. Entonces, con base en las figuras 4.2-4.5, correspondientes a las tasas S/N para estrategia en espiral, puede verse que los niveles óptimos para esta estrategia son una velocidad de corte en su tercer nivel $v_c = 55 \left[\frac{m}{min} \right]$, un avance en nivel dos $f = 500 \left[\frac{mm}{min} \right]$, una profundidad de corte $t = 0.8 [mm]$ que corresponde al primer nivel, y un diámetro útil del cortador $d = 75\%$, el cual es el segundo nivel.

De la misma manera, usando las figuras 4.6-4.9 de las tasas S/N para estrategia en zigzag, puede afirmarse que los niveles óptimos para esta estrategia son tres en velocidad de corte $v_c = 55 \left[\frac{m}{min} \right]$, uno en avance $f = 400 \left[\frac{mm}{min} \right]$, uno en profundidad de corte $t = 0.8 [mm]$ y también uno en diámetro útil $d = 70\%$.

Finalmente, con las figuras 4.10-4.13 de las tasas S/N para estrategia en un sentido, vemos que los niveles óptimos son tres para velocidad de corte $v_c = 55 \left[\frac{m}{min} \right]$, tres para avance $f = 600 \left[\frac{mm}{min} \right]$, dos para profundidad de corte $t = 1.6 [mm]$ y dos para diámetro útil $d = 75\%$.

Después de haber realizado el análisis S/N se decidió graficar también el resultado de la rugosidad. Para cada gráfica se calculó el promedio de las tres mediciones de rugosidad donde está presente el factor al nivel indicado. Por ejemplo, para el primer punto de la velocidad de corte, se emplearon los primeros tres resultados de la Tabla 3.6, pues en éstos está presente el nivel de $v_c = 35 \left[\frac{m}{min} \right]$, que es el primer nivel de este factor (Tabla 3.4).

Rugosidad Ra en estrategia en espiral (Figuras 4.14 - 4.17)

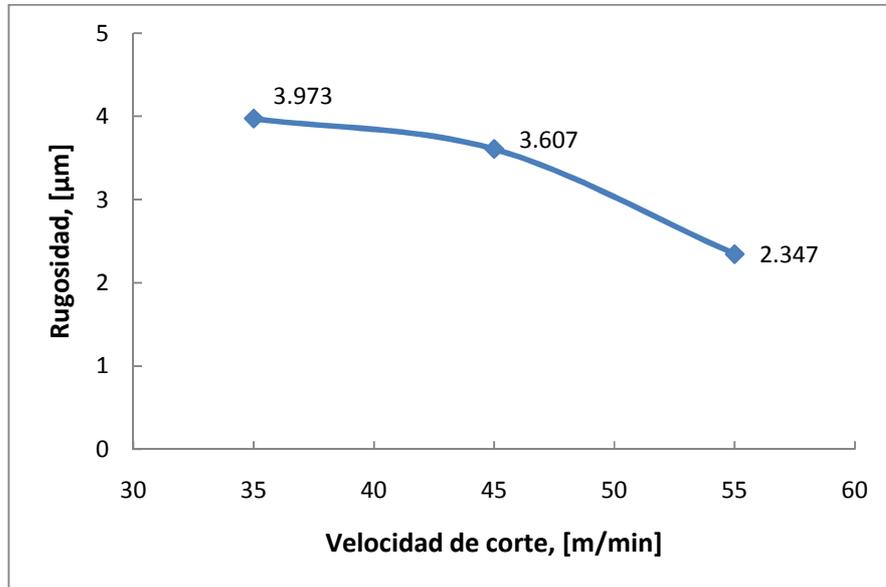


Figura 4.14 Rugosidad vs velocidad de corte estrategia en espiral

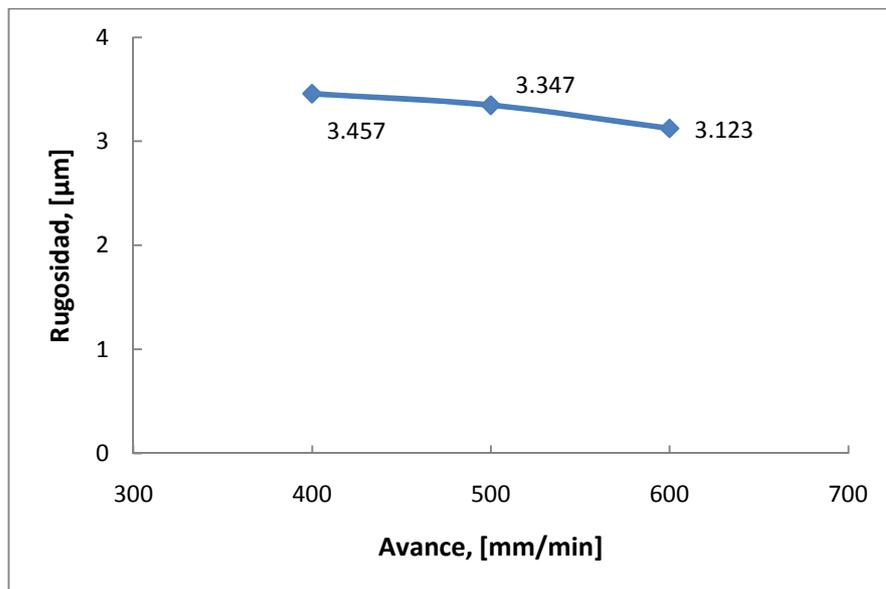


Figura 4.15 Rugosidad vs avance estrategia en espiral

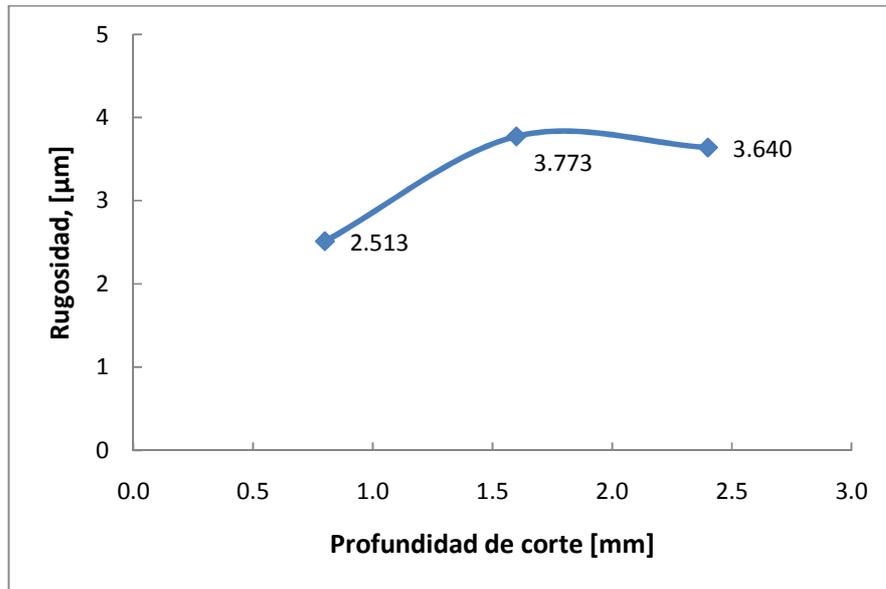


Figura 4.16 Rugosidad vs profundidad de corte estrategia en espiral

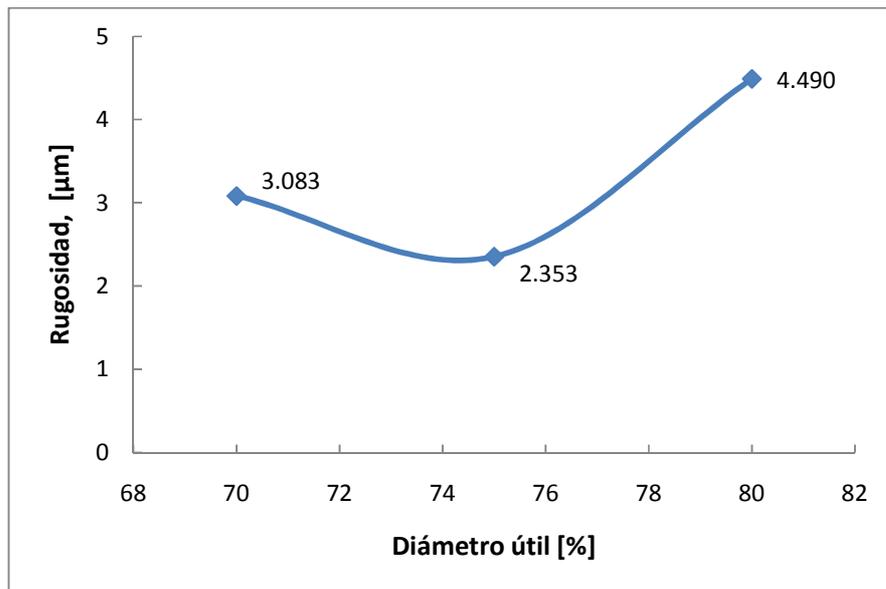


Figura 4.17 Rugosidad vs diámetro útil estrategia en espiral

Rugosidad Ra en estrategia en zigzag (Figuras 4.18 - 4.21)

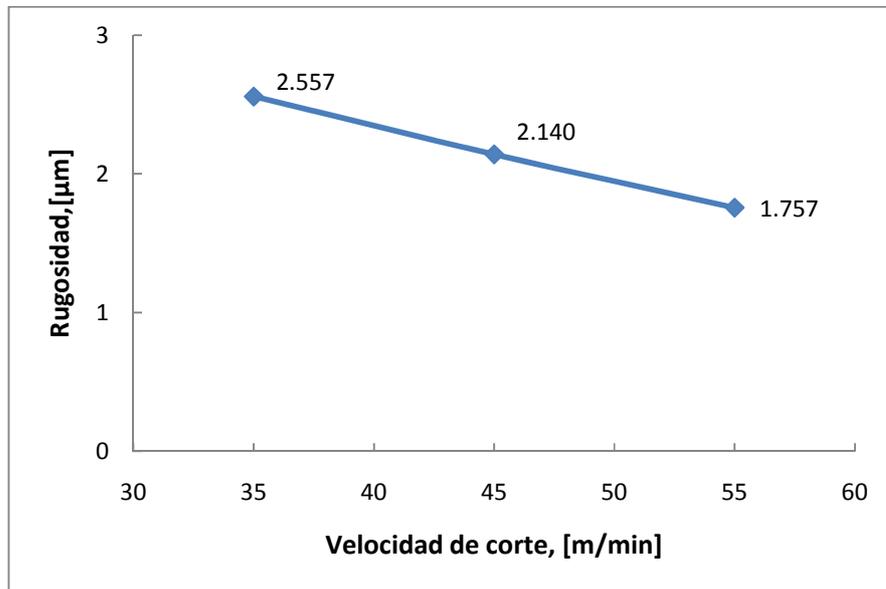


Figura 4.18 Rugosidad vs velocidad de corte estrategia en zigzag

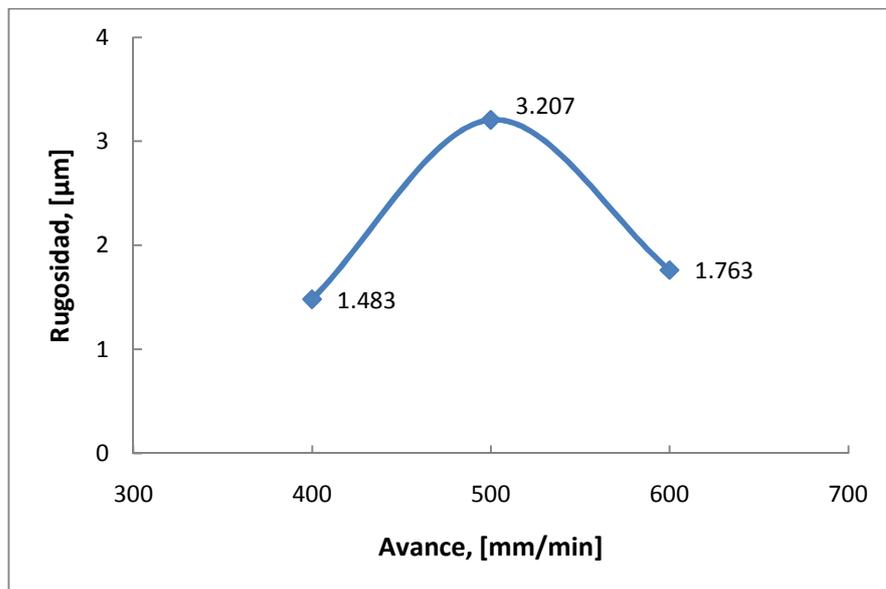


Figura 4.19 Rugosidad vs avance estrategia en zigzag

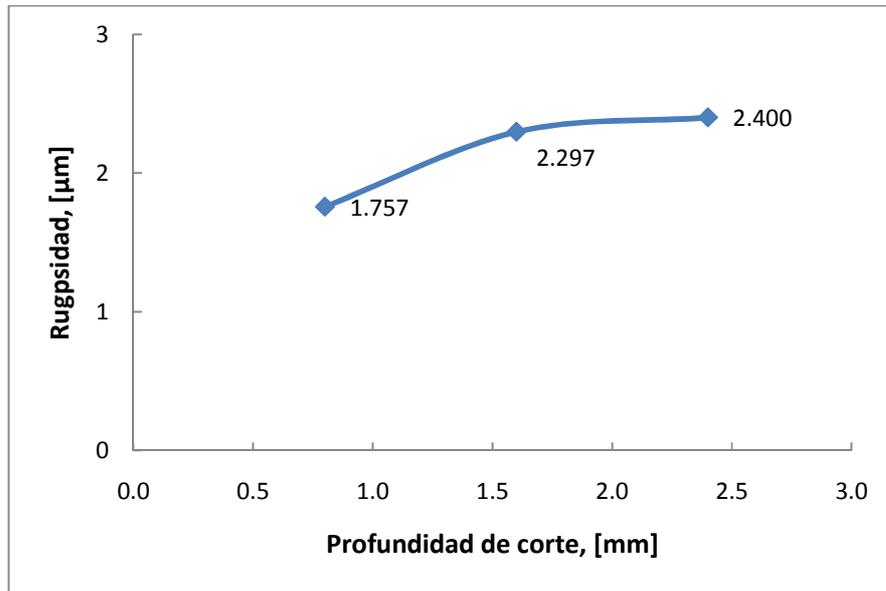


Figura 4.20 Rugosidad vs profundidad de corte estrategia en zigzag

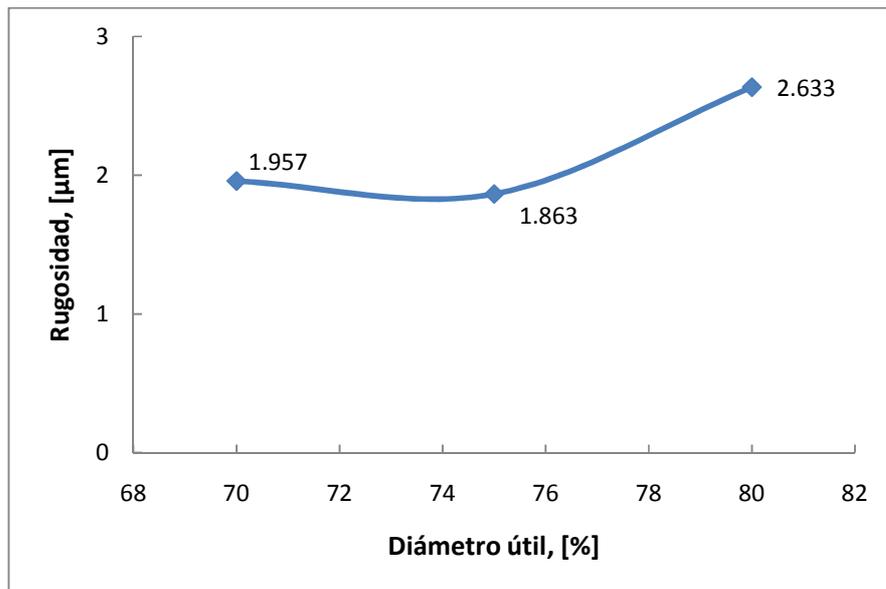


Figura 4.21 Rugosidad vs diámetro útil estrategia en zigzag

Rugosidad Ra en estrategia en un sentido (Figuras 4.22 - 4.25)

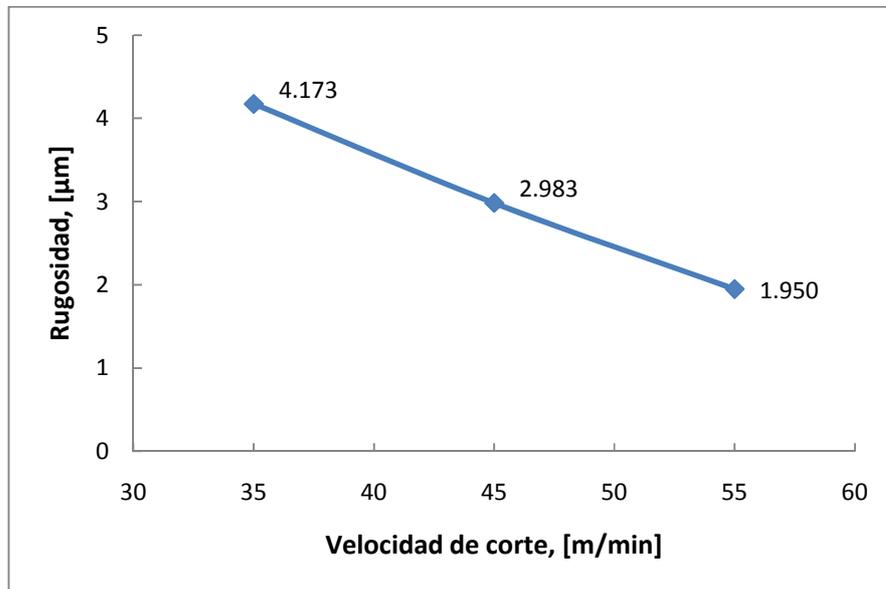


Figura 4.22 Rugosidad vs velocidad de corte en un sentido

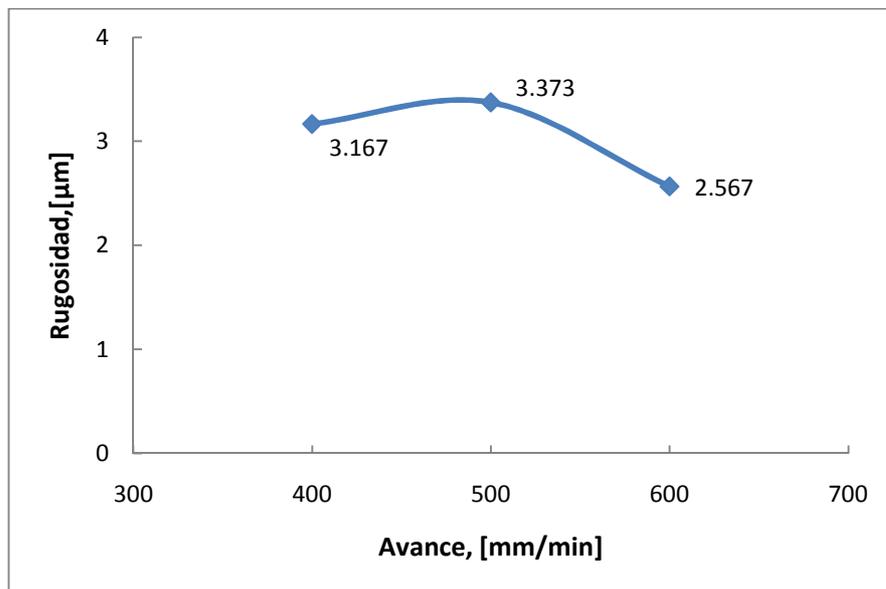


Figura 4.23 Rugosidad vs avance en un sentido

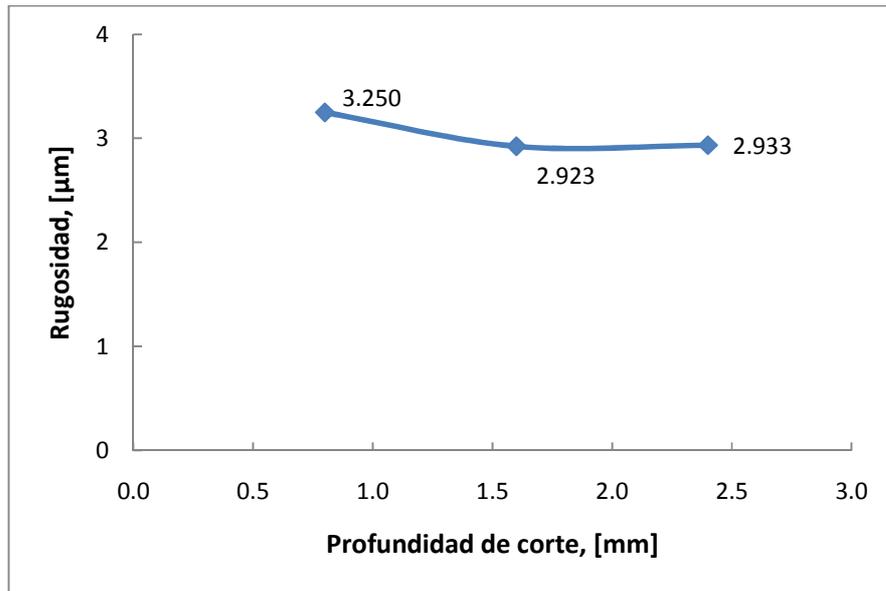


Figura 4.24 Rugosidad vs profundidad de corte en un sentido

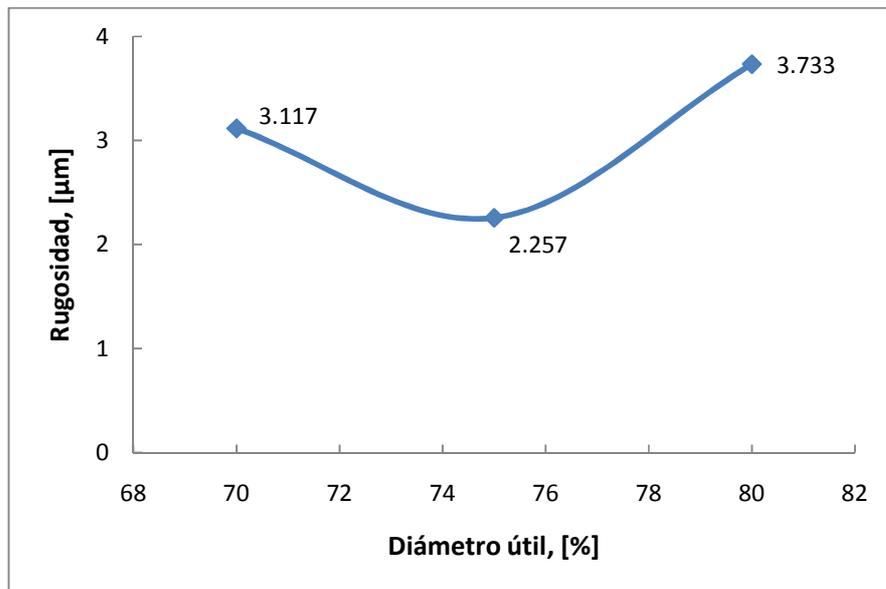


Figura 4.25 Rugosidad vs diámetro útil en un sentido

A continuación se muestran gráficas en las que se comparan los resultados de las tres diferentes estrategias de corte para cada factor:

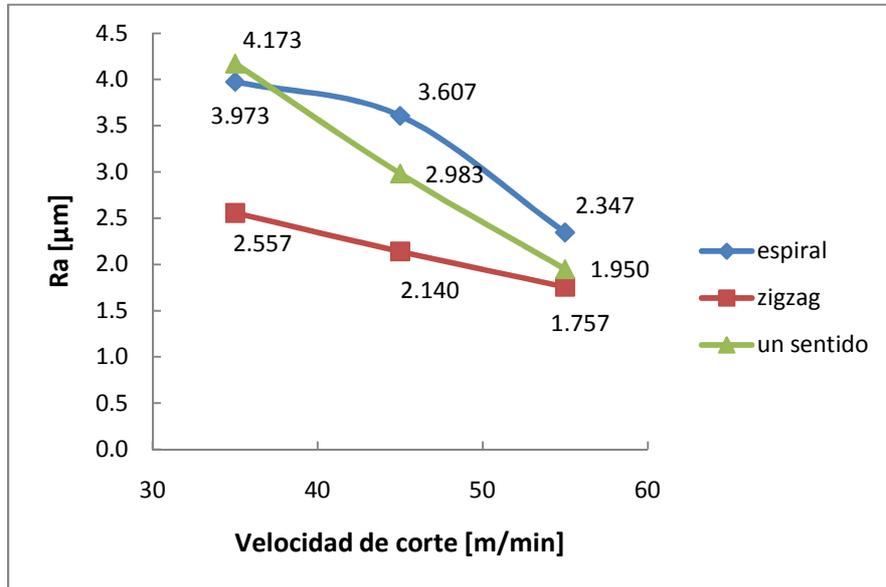


Figura 4.26 Comparación entre las estrategias de corte con la de velocidad de corte

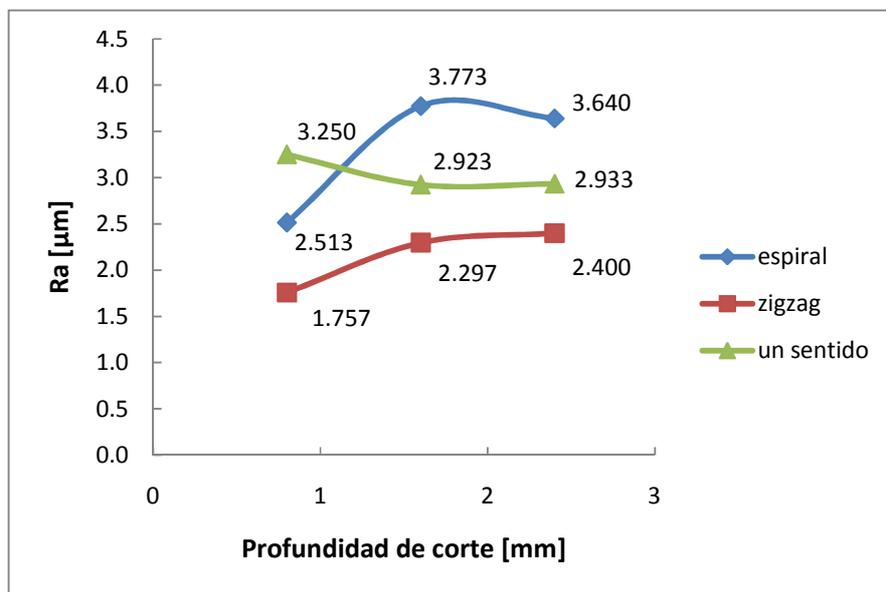


Figura 4.27 Comparación entre las estrategias de corte con la profundidad de corte

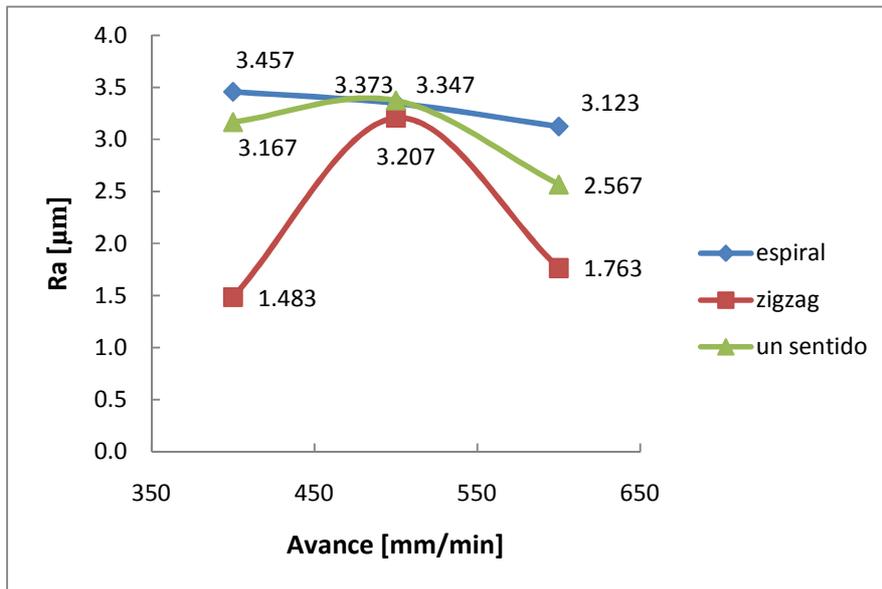


Figura 4.28 Comparación entre las estrategias de corte con el avance

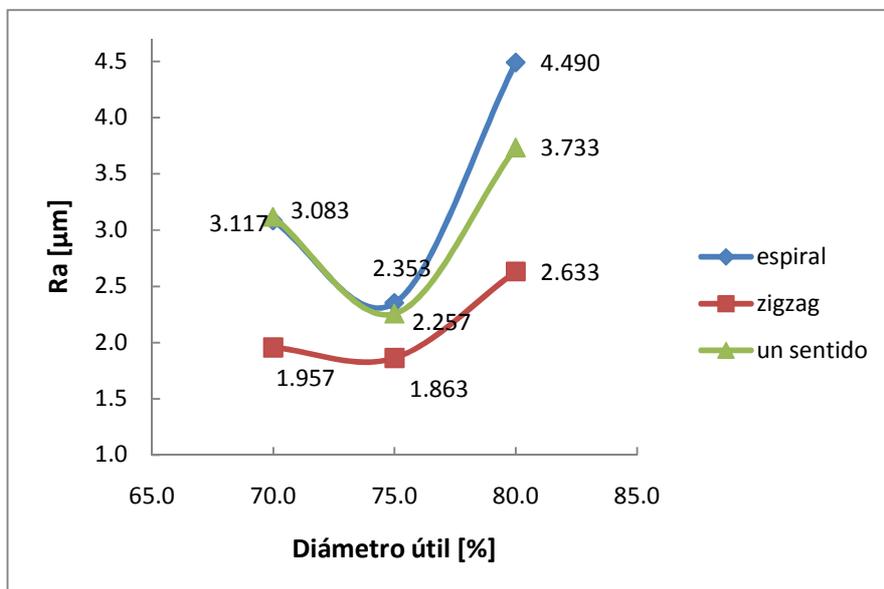


Figura 4.29 Comparación entre las estrategias de corte con el diámetro útil

4.2 Análisis ANOVA

El análisis en el DOE se refiere a las cosas que se hacen con los resultados después de que se llevan a cabo los experimentos y se evalúan las pruebas. Todos los cálculos son llevados a cabo para apoyar las observaciones, conclusiones y recomendaciones hechas a los experimentos. Dependiendo de la complejidad de los cálculos involucrados, el análisis puede hacerse en dos partes.

El análisis de la varianza (*ANOVA*, siglas en inglés de Analysis Of Variance) es algo necesario si se quiere ir más allá de lo obtenido por el análisis simple. Generalmente, ANOVA admitirá cálculos, pruebas y observaciones de la siguiente naturaleza:

- 1.- Influencia relativa del factor y su interacción con la variación de los resultados.
- 2.- Prueba de significancia de un factor y las interacciones asignadas a las columnas
- 3.- Intervalo de confianza (C.I.) en el desempeño óptimo
- 4.- Intervalo de confianza de los efectos principales de los factores
- 5.- Término/factor error, el cual incluye la influencia de todos los factores no incluidos en el experimento y los efectos del error experimental.

Con la información de ANOVA sobre los experimentos, se puede tener un mejor entendimiento en el producto/proceso bajo estudio del que proveería el sentido común o el análisis simple.

El mayor objetivo de ANOVA es extraer de los resultados qué tanta variación relativa causa cada factor (o interacción asignada a la columna) a la variación total observada en el resultado. El término variación es usado en descripciones matemáticas. Pero pensando gráficamente, el término variación trae imágenes de distribuciones de población con forma parabólica o distribución gaussiana. No es importante si la curva está bien formada o es una distribución normal, lo que importa es la amplitud de la imagen, la cual es directamente proporcional a la variación de los datos. Para un estudio con los factores A, B, C,..., la variación total de los resultados pueden ser mostrados por una distribución grande y la influencia de los factores individuales en distribuciones dentro de ésta (Figura 4.26). Para expresar la influencia de un factor individual al total se utiliza una fracción (%) de la variación total como se muestra en la Figura 4.27 La variación causada por un factor individual puede expresarse como un porcentaje de la variación total.

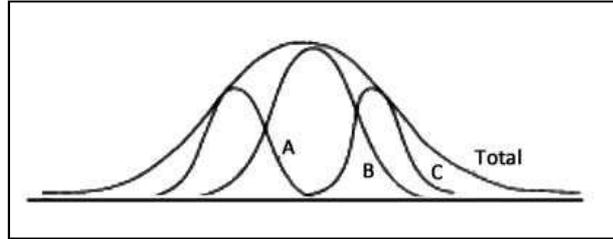


Figura 4.30 Influencia total y de los factores¹⁰⁷

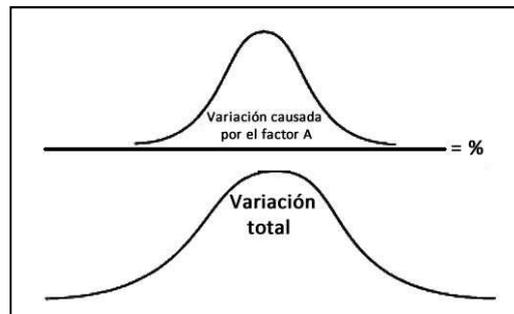


Figura 4.31 Influencia de un factor como porcentaje del total¹⁰⁷

Para un conjunto de datos (resultados) $\bar{Y}_1, \bar{Y}_2, \dots, \bar{Y}_N$ la variación total puede ser calculada añadiendo desviaciones al promedio de los datos individuales. Si las desviaciones son recogidas tal cual, la desviación de un punto que cae a la izquierda del promedio será cancelada por otra igualmente alejada del promedio por la derecha. Para asegurar que todas las desviaciones son contabilizadas, las desviaciones individuales son elevadas al cuadrado, lo cual las fuerza a ser valores positivos (Figura 4.28)

$$S_T = \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (4.6)$$

donde

S_T suma de cuadrados total

Y_i resultados

\bar{Y} promedio de los resultados

Que puede reducirse a la siguiente forma:

$$S_T = \sum_{i=1}^N Y_i^2 - \frac{T^2}{N}$$

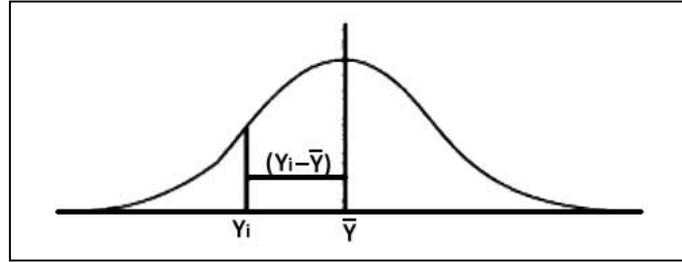


Figura 4.32 Cálculo de la suma de cuadrados total¹⁰⁷

Siguiendo un enfoque similar, la variación causada por un factor individual, digamos A, se obtiene por una expresión llamada *suma de los cuadrados*

$$S_A = \frac{A_1^2}{N_{A1}} + \frac{A_2^2}{N_{A2}} - C.F. \quad (4.7)$$

$$C.F. = \frac{T^2}{N}$$

donde

S_A suma de cuadrados de A

A_1 suma total de resultados (y_i) que incluyen el factor A_1

N_{A1} número total de experimentos en los cuales el nivel 1 del factor A está presente

C.F. factor de corrección

T suma total de los resultados y_i

N numero de resultados

La suma de cuadrados total y la suma de cuadrados son los cálculos básicos necesarios para un ANOVA. Otras cuatro cantidades son calculadas como parte de la información de la tabla ANOVA y todas se derivan de la suma de cuadrados. Para un factor A, son las siguientes:

$$\text{Cuadrados medios (varianza): } V_A = \frac{S_A}{f_A} \quad (4.8)$$

$$\text{Valor F } F_A = \frac{V_A}{V_e} \quad (4.9)$$

$$\text{Suma de cuadrados pura}^1: S'_A = S_A - (V_e \times f_A) \quad (4.10)$$

¹Traducción literal de *Pure sum of squares*, como aparece en Design of Experiments Using The Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement.

$$\text{Porcentaje de influencia } P_A = \frac{S'_A}{S_T} \quad (4.11)$$

donde

V_A varianza del término A

S_A suma de cuadrados del término A

f_A grados de libertad (*DOF*, siglas en inglés de Degrees Of Freedom) del factor A

F_A valor F del término A

V_e varianza del *término error* (obtenido al dividir la suma de los cuadrados de error entre los grados de libertad del error)

S'_A suma de cuadrados pura del término A

P_A porcentaje de influencia del término A

S_T suma de cuadrados total

Grados de libertad

Los grados de libertad es un término muy común usado en la ingeniería. Cuando se usa en un análisis estadístico, *DOF* es un indicativo de la cantidad de información contenida en el conjunto de datos. Por ejemplo, si se tienen tres números en un conjunto, los grados de libertad $DOF = 3 - 1 = 2$, que muestra la cantidad de información que puede extraerse al considerar las diferencias entre los tres números. En otras palabras, si se tienen tres personas, se necesitarían dos comparaciones para determinar quién es la más alta.

En el análisis estadístico de resultados experimentales, los *DOF* son empleados para caracterizar cuatro elementos separados. Se necesitan comprender cuatro definiciones.

DOF de un factor = número de niveles del factor - 1

DOF de una columna = número de niveles de la columna - 1

DOF de un arreglo = DOF de todas las columnas del arreglo

DOF del experimento = número total de resultados - 1

Habiendo definido las operaciones y cálculos que se emplean en el análisis ANOVA, se realizó éste con base en los resultados de *Ra* mostrados en la Tabla 3.6. Se presenta solamente un caso desarrollando todos los cálculos, el correspondiente a la estrategia en espiral. Para las otras dos estrategias se presentan los resultados reunidos en su correspondiente Tabla ANOVA.

Estrategia en espiral

$$\text{Grados de libertad totales} \quad f_T = 9 - 1 = 8$$

$$\text{Grados de libertad de un factor} \quad f_F = 3 - 1 = 2$$

$$\text{Grados de libertad del término error} \quad f_e = 8 - (2 + 2 + 2 + 2) = 0$$

$$\text{Factor de corrección} \quad C.F. = \frac{T^2}{N} = \frac{(29.78 [\mu m])^2}{9} = 98.5387 [\mu m^2]$$

Suma de cuadrados total

$$S_T = \sum_{i=1}^N Y_i^2 - C.F. = ((3.1\mu m)^2 + (3.52\mu m)^2 + (5.3\mu m)^2 + (5.4\mu m)^2 + (3.75\mu m)^2 + (1.67\mu m)^2 + (1.87\mu m)^2 + (2.77\mu m)^2 + (2.4\mu m)^2) - (98.5387\mu m^2) = 14.4929\mu m^2$$

Suma de cuadrados de los factores

Velocidad de corte

$$S_{V_c} = \left(\frac{V_{c_1}^2}{N_{V_{c_1}}} + \frac{V_{c_2}^2}{N_{V_{c_2}}} + \frac{V_{c_3}^2}{N_{V_{c_3}}} \right) - C.F. = \left(\frac{11.92\mu m^2}{3} + \frac{10.82\mu m^2}{3} + \frac{7.04\mu m^2}{3} \right) - (98.5387\mu m^2) = 4.3681\mu m^2$$

Avance

$$S_f = \left(\frac{f_1^2}{N_{f_1}} + \frac{f_2^2}{N_{f_2}} + \frac{f_3^2}{N_{f_3}} \right) - C.F. = \left(\frac{10.37\mu m^2}{3} + \frac{10.04\mu m^2}{3} + \frac{9.37\mu m^2}{3} \right) - (98.5387\mu m^2) = 0.1731\mu m^2$$

Profundidad de corte

$$S_t = \left(\frac{t_1^2}{N_{t_1}} + \frac{t_2^2}{N_{t_2}} + \frac{t_3^2}{N_{t_3}} \right) - C.F. = \left(\frac{7.54\mu m^2}{3} + \frac{11.32\mu m^2}{3} + \frac{10.92\mu m^2}{3} \right) - (98.5387\mu m^2) = 2.8747\mu m^2$$

Diámetro útil del cortador

$$S_d = \left(\frac{d_1^2}{N_{d_1}} + \frac{d_2^2}{N_{d_2}} + \frac{d_3^2}{N_{d_3}} \right) - C.F = \left(\frac{9.25\mu m^2}{3} + \frac{7.06\mu m^2}{3} + \frac{13.47\mu m^2}{3} \right) - (98.5387\mu m^2)$$
$$= 7.0769\mu m^2$$

Suma de cuadrados del término error

$$S_e = S_T - (S_{V_c} + S_f + S_t + S_d) = 14.49\mu m^2 - (4.3681\mu m^2 + 0.1731\mu m^2 + 2.8747\mu m^2 + 7.0769\mu m^2) = 0$$

Los cuadrados medios (varianza) de un factor se calculan simplemente como la suma de cuadrados entre los grados de libertad. Entonces:

$$V_{V_c} = \frac{S_{V_c}}{f_{V_c}} = \frac{4.3681}{2} = 2.18405\mu m^2$$

$$V_f = \frac{S_f}{f_f} = \frac{0.1731}{2} = 0.0865\mu m^2$$

$$V_t = \frac{S_t}{f_t} = \frac{2.8747}{2} = 1.4373\mu m^2$$

$$V_d = \frac{S_d}{f_d} = \frac{7.0769}{2} = 3.5384\mu m^2$$

Varianza del término error

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{0}{0}$$

Dado que existe una indeterminación, no se pueden calcular los valores F.

$$F_{V_c} = \frac{V_{V_c}}{V_e}$$

Con el valor indeterminado de V_e , todas las sumas de cuadrados puras corresponden a la suma de cuadrados. Esto hace que S' sea igual a S .

$$S'_{V_c} = S_{V_c} - (V_e \times f_{V_c}) \therefore S'_{V_c} = S_{V_c}$$

$$S'_f = S_f$$

$$S'_t = S_t$$

$$S'_d = S_d$$

Los porcentajes de influencia de los factores se calculan al comparar la *suma de cuadrados* pura de los factores con respecto a la *suma de cuadrados total*.

$$P_{V_c} = \frac{S'_{V_c}}{S_T} = \frac{4.3681\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 30.13\%$$

$$P_f = \frac{S'_f}{S_T} = \frac{0.1731\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 1.19\%$$

$$P_t = \frac{S'_t}{S_T} = \frac{2.8747\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 19.83\%$$

$$P_d = \frac{S'_d}{S_d} = \frac{7.0769\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 48.83\%$$

El porcentaje de influencia del término error se calcula restando al total la suma de todas las influencias de los factores. Dado que DOF del error es cero, la influencia del término error es cero. La influencia de cada factor es llamada propiamente *porcentaje de influencia relativa*.

$$P_e = 100 - (P_{V_c} + P_f + P_t + P_d) = 100\% - (30.13\% + 1.19\% + 19.83\% + 48.83\%) = 0$$

Todos los parámetros calculados para esta estrategia se resumen en una Tabla ANOVA (Tabla 4.4)

Factor	Grados de libertad (f)	Suma de cuadrados (S) [μm^2]	Varianza (V) [μm^2]	Valor F (F)	Suma de cuadrados pura (S') [μm^2]	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	4.3681	2.18405	-----	4.3681	30.13
Avance f	2	0.1731	0.0865	-----	0.1731	1.19
Profundidad de corte t	2	2.8747	1.4373	-----	2.8747	19.83
Diámetro útil d	2	7.0769	3.5384	-----	7.0769	48.83
Error	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total	8	14.4929				100

Tabla 4.4 Tabla ANOVA de la estrategia en espiral

A continuación se presentan las Tablas ANOVA de la estrategia en zigzag (Tabla 4.5) y de la estrategia en un sentido (Tabla 4.6):

Factor	Grados de libertad (f)	Suma de cuadrados (S) [μm^2]	Varianza (V) [μm^2]	Valor F (F)	Suma de cuadrados pura (S') [μm^2]	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	0.9605	0.4802	-----	0.9605	12.20
Avance f	2	5.1315	2.5657	-----	5.1315	65.22
Profundidad de corte t	2	0.7161	0.3580	-----	0.7161	9.10
Diámetro útil d	2	1.0595	0.5297	-----	1.0595	13.46
Error	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total	8	7.8677				100

Tabla 4.5 Tabla ANOVA de la estrategia en zigzag

Factor	Grados de libertad (f)	Suma de cuadrados (S) [μm^2]	Varianza (V) [μm^2]	Valor F (F)	Suma de cuadrados pura (S') [μm^2]	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	7.4271	3.7135	-----	7.4271	61.95
Avance f	2	1.0535	0.5267	-----	1.0535	8.78
Profundidad de corte t	2	0.2071	0.1035	-----	0.2071	1.72
Diámetro útil d	2	3.3005	1.6502	-----	3.3005	27.53
Error	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Total	8	11.9881				100

Tabla 4.6 Tabla ANOVA de la estrategia en un sentido

ANOVA descartando un factor

En el análisis que se ha hecho, el porcentaje de influencia del término error no podía calcularse. Sin embargo hay una forma para que esté presente, y esta es *descartando* un factor. Una forma para decidir qué factor se puede descartar es mediante la prueba de significancia, pero ésta sólo puede aplicarse cuando los f_e son diferentes a cero, lo que ocurre en este caso.

No obstante, la literatura recomienda descartar un factor mediante otro método que consiste en comparar la suma de cuadrados de los factores y descartar al que tenga menor influencia. Se recomienda descartar al factor que sea aproximadamente un 10% o menos del factor más influyente.

Otra vez se incluye un solo desarrollo de los cálculos, esta vez de manera reducida. Las otras dos tablas se obtuvieron de la misma forma.

Estrategia en espiral

Factor descartado: avance

$$\text{Grados de libertad del término error } f_e = 8 - (2 + 2 + 2) = 2$$

Suma de cuadrados del término error

$$\begin{aligned} S_e &= S_T - (S_{v_c} + S_f + S_t + S_d) = 14.49\mu\text{m}^2 - (4.3681\mu\text{m}^2 + 2.8747\mu\text{m}^2 + 7.0769\mu\text{m}^2) \\ &= 0.1703\mu\text{m}^2 \end{aligned}$$

Varianza del término error

$$V_e = \frac{S_e}{f_e} = \frac{0.1703\mu m^2}{2} = 0.0851\mu m^2$$

Valores F.

$$F_{V_c} = \frac{V_{V_c}}{V_e} = \frac{2.18405\mu m^2}{0.0851\mu m^2} = 25.6645$$

$$F_t = \frac{V_t}{V_e} = \frac{1.4373\mu m^2}{0.0851\mu m^2} = 16.8895$$

$$F_d = \frac{V_d}{V_e} = \frac{3.5384\mu m^2}{0.0851\mu m^2} = 41.5793$$

Suma de cuadrados pura

$$S'_{V_c} = S_{V_c} - (V_e \times f_{V_c}) = 4.3681\mu m^2 - (0.0851\mu m^2 \times 2) = 4.1979\mu m^2$$

$$S'_t = S_t - (V_e \times f_t) = 2.8747\mu m^2 - (0.0851\mu m^2 \times 2) = 2.7045\mu m^2$$

$$S'_d = S_d - (V_e \times f_d) = 7.0769\mu m^2 - (0.0851\mu m^2 \times 2) = 6.9067\mu m^2$$

Los porcentajes de influencia

$$P_{V_c} = \frac{S'_{V_c}}{S_T} = \frac{4.1979\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 28.96\%$$

$$P_t = \frac{S'_t}{S_T} = \frac{2.7045\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 18.66\%$$

$$P_d = \frac{S'_d}{S_T} = \frac{6.9067\mu m^2}{14.4929\mu m^2} \times 100 = 47.65\%$$

El porcentaje de influencia del término error

$$P_e = 100 - (P_{V_c} + P_f + P_t + P_d) = 100\% - (28.96\% + 18.66\% + 47.65\%) = 4.73\%$$

Es así que la Tabla ANOVA de la estrategia en espiral descartando un factor queda así (Figura 4.7):

Factor	Grados de libertad (<i>f</i>)	Suma de cuadrados (<i>S</i>) μm^2	Varianza (<i>V</i>) μm^2	Valor F (<i>F</i>)	Suma de cuadrados pura (<i>S'</i>) μm^2	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	4.3681	2.18405	25.6645	4.1979	28.96
Avance f	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Profundidad de corte t	2	2.8747	1.4373	16.8895	2.7045	18.66
Diámetro útil d	2	7.0769	3.5384	41.5793	6.9067	47.65
Error		0.1703	0.0851			4.73
Total	8	14.49				100

Tabla 4.7 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en espiral

En seguida se muestran las Tablas ANOVA descartando un factor de la estrategia en zigzag (Tabla 4.8) y en un sentido (Tabla 4.9):

Factor	Grados de libertad (<i>f</i>)	Suma de cuadrados (<i>S</i>) μm^2	Varianza (<i>V</i>) μm^2	Valor F (<i>F</i>)	Suma de cuadrados pura (<i>S'</i>) μm^2	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	0.9605	0.4802	1.3409	0.2443	3.10
Avance f	2	5.1315	2.5657	7.1647	4.4153	56.11
Profundidad de corte t	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Diámetro útil d	2	1.0595	0.5297	1.4791	0.3433	4.36
Error	2	0.7162				36.43
Total	8	7.8677				100

Tabla 4.8 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en zigzag

Factor	Grados de libertad (f)	Suma de cuadrados (S) μm^2	Varianza (V) μm^2	Valor F (F)	Pure suma de cuadrados (S') μm^2	Porcentaje [%]
Velocidad de Corte v_c	2	7.4271	0.4802	35.8792	7.2201	60.22
Avance f	2	1.0535	1.0535	5.0888	0.8465	7.06
Profundidad de corte t	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Diámetro útil d	2	3.3005	0.5297	15.9439	3.0935	25.80
Error	2	0.7162				6.92
Total	8	0.207				100

Tabla 4.9 Tabla ANOVA descartando un factor de la estrategia en un sentido

A manera de muestra, simplemente, se presenta la Tabla 4.10 donde se indican los tiempos en los que se realizaron los maquinados para las tres diferentes estrategias de corte.

Experimento	Espiral	Zigzag	Un sentido
1	8min 31s	9min 31s	16 min 9s
2	3min 30s	4min 17s	7min 2s
3	2min 56s	3min 44s	6min 30s
4	4min 14s	5min 6s	7min 48s
5	3min 34s	4min 32s	7min 56s
6	5min 41s	6 min 21s	11min 39s
7	4min 18s	5min 6s	7min 48s
8	6min 39s	7min 26s	12min 42s
9	3min 2s	3min 56s	7min 21s

Tabla 4.10 Tiempos de maquinado

Hasta aquí se mostraron los resultados que se obtuvieron al realizar los cálculos del análisis S/N y del análisis de varianza. En el siguiente capítulo se presenta una interpretación de estos datos.

Capítulo V. Análisis y conclusiones

Análisis de resultados

De acuerdo a los resultados de rugosidad que se muestran en la Tabla 3.6 se realizaron dos análisis. El primero fue el de señal de ruido (S/N), con el que se obtuvieron los niveles de los factores en los que se presenta un mejor desempeño. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el cual se averiguó cuánto aporta cada factor a la variación de los resultados, rugosidad superficial en este caso.

En lo que corresponde al análisis S/N, respecto a la velocidad de corte, cuando se observan las figuras 4.2, 4.6, 4.10, 4.14, 4.18 y 4.22 se puede confirmar que a mayor velocidad de corte se obtiene una mejor rugosidad superficial, que está de acuerdo con lo reportado en la literatura relativa a procesos de maquinado. En las gráficas, se observa que cuando la velocidad de corte se encuentra en $55 \left[\frac{m}{min} \right]$ -que es el valor mayor empleado en el experimento- la señal de ruido presenta el valor más cercano a cero, con lo que se puede considerar que hay una relación directamente proporcional entre la velocidad de corte y la rugosidad. Este comportamiento se presentó en las tres estrategias de corte: espiral, zigzag y un sentido.

Para el factor avance, con base en lo que muestran las figuras 4.3, 4.7, 4.11, 4.15, 4.19 y 4.23 no se puede considerar que exista un comportamiento característico, pues se presentaron resultados diferentes en cada estrategia. En la estrategia en espiral, el nivel que arrojó mejores resultados fue de $500 \left[\frac{mm}{min} \right]$. En cambio, en la estrategia en zigzag, ese segundo nivel ($500 \left[\frac{mm}{min} \right]$) fue con el que se obtuvieron resultado más lejanos de cero (considerados como ya se indico no satisfactorios); para este caso el nivel de $400 \left[\frac{mm}{min} \right]$ fue con el que mejores acabados se lograron. Con la estrategia de un sentido se consiguieron mejores resultados con el nivel de $600 \left[\frac{mm}{min} \right]$ y no satisfactorios con el primer nivel ($500 \left[\frac{mm}{min} \right]$, que fue el mejor en espiral). Es así que, tomando en cuenta todo lo anterior, se puede decir que no se obtuvo una tendencia con las pruebas y no se tienen elementos para afirmar qué nivel es con el que se consigue mejor rugosidad superficial, en relación con los avances propuestos en este trabajo.

Respecto a la profundidad de corte, cuando se observan las figuras 4.4, 4.8, 4.16 y 4.20 puede concluirse que una menor profundidad de corte permite lograr una mejor rugosidad

superficial. Pues para la estrategia en espiral, el nivel de 0.8 [mm] permitió obtener mejor acabado que los otros dos niveles. En la estrategia de zigzag, también el primer nivel, 0.8 [mm], produjo mejor acabado que los niveles de 1.6 [mm] y 2.4 [mm]. Sin embargo, el resto de las figuras (4.12 y 4.24), correspondientes a la estrategia de un sentido, muestran el nivel medio, de 1.6 [mm], como el que mejor resultado genera. Así pues, se puede recomendar emplear una menor profundidad de corte para obtener mejor rugosidad superficial. Sin embargo, no se asegura que con la estrategia en un sentido se obtenga buen resultado.

El último factor, el diámetro útil, sí presenta un comportamiento característico en las tres estrategias de corte. Cuando se observan las figuras 4.5, 4.9, 4.13, 4.17, 4.21 y 4.25 se puede establecer que el nivel de diámetro útil más adecuado es el medio (75%), ya que permite lograr mejor rugosidad en todas las estrategias: espiral, zigzag y un sentido.

Los resultados obtenidos con el análisis de S/N eran esperados, algunos de ellos. Por ejemplo, aumentar la velocidad de corte y disminuir el avance por pasada. Estos dos resultados obtenidos experimentalmente confirmaron una práctica común. Por el contrario, un resultado que no se esperaba fuese tan arbitrario fue el avance. Se esperaba que el avance presentara un comportamiento que permitiera hacer una clara elección sobre qué nivel elegir, y así obtener el comportamiento típico aplicable a casos más generales. Sin embargo, con los resultados obtenidos para este factor, no se puede establecer un indicador de cómo afecta a la rugosidad. El resultado con el diámetro útil fue un tanto inesperado, pues se pensaba que un mayor porcentaje del diámetro de la herramienta era mejor, lo cual no sucedió.

Mediante el análisis de varianza (ANOVA), se obtuvo que en la estrategia de corte en espiral, el factor diámetro útil es el que aporta un porcentaje mayor, con 48.83%. En la estrategia en zigzag, el factor con mayor porcentaje fue el avance con 65.22%. Finalmente, en la estrategia en un sentido, con 61.95%, la velocidad de corte es el parámetro que más aporta al resultado final.

Estos resultados son un tanto desconcertantes. Por ejemplo, para la estrategia en espiral, que el diámetro útil sea el factor que más aporta a la variación del resultado y que el avance signifique solamente 1.19% parece inverosímil. En la estrategia de zigzag, es creíble que el avance sea el factor con mayor peso, sin embargo la diferencia en el porcentaje de éste factor con los otros tres es muy grande. Para la estrategia de un sentido, el aporte mayor corresponde a la velocidad de corte, lo cual resulta admisible; mas no parece serlo que la profundidad de corte represente un porcentaje tan bajo, 1.72%. Es así que, mediante este segundo análisis, si bien se obtuvieron porcentajes de cada uno de los factores (velocidad de corte, avance, profundidad de

corte y diámetro útil) en los tres modos de corte, no se esperaba que existieran diferencias tan marcadas entre cada factor.

Cuando se consideró el término error en los cálculos del ANOVA, se obtuvieron resultados semejantes a los que no consideraban el término (Tablas 4.4 a 4.9). Los porcentajes no variaron cuantiosamente, por ejemplo en la estrategia en espiral, la velocidad de corte aportó 30.13% cuando no se calculó el término error, y 29.96% cuando sí se calculó. Vale la pena destacar el caso de la estrategia en zigzag cuando se tomó en cuenta el error, pues éste presenta una influencia notable al resultado, con 36.43%.

Cabe señalar que el término error está constituido por diferentes elementos. Los factores que no se consideran en el experimento son uno de esos elementos, estos factores son excluidos por una u otra razón, por ejemplo si el maquinado se realizó con lubricante o no. Otro de los componentes del término error son los factores que no se pueden controlar o factores de ruido, en este caso particular puede ser la habilidad del operador o el desgaste de la herramienta. Asimismo, el error experimental es otro de los elementos que constituyen el término error, aquí se refiere a los errores que pudieron cometerse en la toma y manipulación de resultados o en la realización del mismo.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos puede afirmarse que la estrategia de corte que realiza más rápido el maquinado de las piezas es la estrategia en espiral. Los tiempos de maquinado que se registran con ésta son menores a las otras dos. Hay diferencia de hasta un minuto entre la estrategia en espiral y en zigzag. Cuando se compara con la estrategia de un sentido, el tiempo es mayor, en algunos casos hasta casi ocho minutos. Por lo cual se recomienda trabajar con la estrategia en espiral. Como una segunda alternativa se recomienda la estrategia en zigzag, ya que los tiempos de maquinado son cercanos a los de la estrategia en espiral.

Respecto a los acabados superficiales que se obtuvieron con las diferentes estrategias, la mejor fue la de zigzag. Con ella se obtuvieron las rugosidades más bajas. Las otras dos estrategias pueden ser empleadas también, aunque los acabados superficiales presentan mayor rugosidad, se encuentran dentro del rango aceptable.

Es así que, si se considera tanto el tiempo de maquinado como la rugosidad superficial, la mejor estrategia de corte es la de zigzag. Entrega tiempos muy cercanos a los mejores, que son los de la estrategia en espiral; así como también presenta los mejores acabados superficiales.

Por lo tanto, de acuerdo al objetivo planteado al inicio, puede afirmarse que se alcanzó, pues se obtuvieron resultados que permiten aseverar que la estrategia en zigzag es la más recomendable. De manera particular, también se cumplieron los objetivos, dado que se consiguieron datos respecto a tiempos de maquinado y acabados superficiales. Sin embargo, aunque se alcanzaran los objetivos generales y particulares, la información recabada no permitió determinar los niveles óptimos de las condiciones de corte para este caso de estudio, por lo que puede ser una línea para continuar la investigación.

Respecto al método empleado puede concluirse que fue bueno como alternativa de verificación experimental, pues si se hubiera deseado realizar el diseño de experimento completo, hubiera significado realizar 243 experimentos. Para cada estrategia, el total de experimentos era de 81 (3^4) lo cual resulta ser un número muy elevado. Eso significaría mucho gasto en material, herramientas (pues el desgaste ya sería algo a considerar), tiempo máquina, etc.

En lo que corresponde a la aplicación del método de Taguchi al proceso de corte, éste permitió obtener algunas conclusiones puntuales, pero se considera que es necesario comprender y dominar mejor el método para aplicarlo en forma más adecuada y obtener valores más acertados y apegados a la realidad. Se recomienda aplicar el método Taguchi y un análisis de mayor amplitud en el proceso de corte para obtener más y mejores resultados.

Bibliografía

1. Amstead, B.H.; OSTWALD, Phillip; BEGEMAN, Myron L. Procesos de Manufactura, 10ma reimpresión. México: CECSA, 1995. 820 p.
2. Sitio web: <http://www.protofab.us/>
Imagen disponible en: http://www.protofab.us/images/MANUAL_BRIDGEPORT.jpg
Consultada en febrero, 2010.
3. Catálogo AFM Máquinas Herramientas Española. Instituto Español de Comercio Exterior. España, 1990. 465 p.
4. Sitio web: <http://www.solostocks.com>
Imagen disponible en: <http://www.solostocks.com/img/fresadora-universal-vertical-4891497z0.jpg>
Consultada en febrero, 2010
- 5 Sitio web: <http://www.directindustry.com>
Imagen disponible en: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/rotary-table-for-turning-and-milling-409094.jpg
Consultada febrero, 2010
6. Sitio web: <http://www.solostocks.com.mx>
Imagen disponible en: <http://www.solostocks.com.mx/img/fresadora-y-perfiladora-x6325a-v-10-x-54-195750z0.jpg>
Consultada en marzo, 2010
7. Sitio web: <http://bctoolandcutter.com>
Imagen disponible: http://bctoolandcutter.com/Site_images/MillingCutters.jpg
Consultado en marzo 2010
8. Sitio web: <http://www.milling-cutter.org>
Imagen disponible en: <http://www.milling-cutter.org/upload/2008-5/200852115314073670.jpg>
Consultada en marzo 2010
9. Sitio web: <http://www.tonicfab.com>
Imagen disponible en http://www.tonicfab.com/uploaded_images/slitting-saw-750240.jpg
Consultada en marzo 2010
- Sitio web: <http://www.martindaleco.com>
Imagen disponible en: <http://www.martindaleco.com/images/MSL.jpg>
Consultada en marzo 2010
10. Sitio web: <http://www.cuttingtool.in>

Imagen disponible en: http://www.cuttingtool.in/pcat-gifs/products-small/single-angle-cutters-equal-angle-cutters_10808620.jpg

Consultada en marzo 2010

11. Sitio web: <http://upload.ecvv.com>

Imagen disponible en:

http://upload.ecvv.com/upload/Product/20089/India_Involute_Gear_Cutters_Milling_Cutters2008942136582.jpg

Consultada en marzo 2010

12. Sitio web: <http://www.directindustry.com>

Imagen disponible en: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/milling-cutter-176787.jpg

Consultada en marzo 2010

13. Sitio web: <http://www.afitool.es>

Imagen disponible en: http://www.afitool.es/milling%20cutter/indice_archivos/image029.jpg

Consultada octubre 2011

14. Sitio web: <http://www.directindustry.com>

Imagen disponible en: http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/face-milling-cutter-46542.jpg

Consultada marzo 2010

15. Kalpakjian, Serope; SCHMID, Steven R.
Manufactura, Ingeniería y Tecnología, 4ta edición.
México: Pearson Educación, 2002. 1176 p.

16. Sitio web: <http://machineryhouse.co.nz>

Imagen disponible en: <http://images.machineryhouse.co.nz/M512/0/375>

Consultada octubre 2011

17. Indrajit, Mukherjee; PRADIP Kumar Ray.

A review of optimization techniques in metal cutting processes.

En: Computers & Industrial Engineering, febrero 2006, numero 50, p. 15 – 34.

18. Montgomery, D. C. (1990). Introduction to statistical quality control (2nd ed.). New York: Wiley.

19. AMAN, Aggarwal; HARI, Singh.

Optimization of machining techniques – A retrospective and literature review.

En: SADHANA – Academy Proceedings In Engineering Sciences, diciembre 2005, vol. 30, p. 699 – 711.

20. Taylor F W 1907 On the art of cutting metals. Trans. ASME 28: 31–35

21. Ai X, Tao Q, Xiao S 1966 Metal cutting condition handbook (China: Mechanics Industry Press)

22. Ai X, Xiao S 1985 Metal cutting condition handbook (China: Mechanics Industry Press)
23. Kasilova A G, Mescheryakov R K 1985 Technological machining handbook (Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall) Vol. 2
24. ASME 1952 Research committee on metal cutting data and bibliography. Manual on cutting of metals with single point tools 2nd edn.
25. Kroneberg M 1966 Theory and practice for operation and development of machining process (Oxford: Pergamon)
26. Sandvik A B 1981 Coroplan process planning software and coroplan user manual, Sandvik Automation, GmbH
27. Armarego E J A, Ostafiev D 1998 A study of a proprietary computerized technological machining performance database. 8th Int. Manufacturing Conference, pp 26–33
28. Ostafiev D 1999 Multiple constraint optimization analysis and software for selecting machining condition on rough turning operation. Ph D thesis, University of Melbourne, Melbourne, Australia
29. Tan, F. P., & Creese, R. C. (1995). A generalized multi-pass machining model for machining parameter selection in turning. *International Journal of Production Research*, 33(5), 1467–1487.
30. Markos, S., Viharos, Zs.J., & Monostori, L. (1998). Quality-oriented, comprehensive modelling of machining processes. Sixth ISMQC IMEKO symposium on metrology for quality control in production (pp. 67–74).
31. Montgomery, D. C., & Peck, E. A. (1992). *Introduction to linear regression analysis* (2nd ed.). New York: Wiley. Taguchi's parameter design: A panel discussion. In V. N. Nair, (Ed.). *Technometrics*, 34, 127–161.
32. Fu, L. (2003). *Neural network in computer intelligence*. India: Tata Mc Graw Hill Edition.
33. Zadeh, L. A. (1973). *Fuzzy sets and application: Selected papers*. R. R. Yager, S. Ovchinnikov, M. Tong, & H. T. Nguyen (Eds.).
34. Ross, P. J. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*. New York: McGraw-Hill.
35. Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiment* (5th ed.). New York: Wiley.
36. Hillier, F. S., & Liebermann, G. J. (1999). *Operations research* (2nd ed.). Delhi: CBS Publishers and Distributors.
37. Goldberg, D. E. (2002). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston, MA: Pearson Education Asia (5th print).
38. Glover, F. (1990a). Tabu search—part II. *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4–32.
39. Glover, F. (1990b). Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20, 74–94.

40. Kirkpatrick, K., Gelett, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Sciences*, 220, 671–680.
41. Hassan, G. A., & Suliman, S. M. A. (1990). Experimental modeling and optimization of turning medium carbon steel. *International Journal of Production Research*, 28(6), 1057–1065.
42. Luong, L. H. S., & Spedding, T. A. (1995). Neural-network system for predicting machining behaviour. *Journal of Materials Processing Technology*, 52, 585–591.
43. Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surface*. New York: Wiley.
44. Klir, G. J., & Yuan, B. (2002). *Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications*. New Delhi: Prentice Hall of India Private Limited (6th print).
45. Ghoreishi, M., Low, D. K. Y., & Li, L. (2002). Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 985–995.
46. Wasserman, G. S. (1996). Parameter design with dynamic quality characteristics: A regression perspective. *Quality and Reliability Engineering International*, 12, 113–117.
47. Tosun, N., & Ozlar, L. (2002). A study of tool life in hot machining using artificial neural networks and regression analysis method. *Journal of Materials Processing Technology*, 124, 99–104.
48. Feng, C. X., & Wang, X. (2002). Development of empirical models for surface roughness prediction in finish turning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 348–356.
49. Lin, J. T., Bhattacharyya, D., & Kecman, V. (2003). Multiple regression and neural networks analyses in composites machining. *Composites Science and Technology*, 63, 539–548.
50. Petri, K. L., Billo, R. E., & Bidanda, B. (1998). A neural network process model for abrasive flow machining operations. *Journal of Manufacturing Science*, 17(1), 52–64.
51. Zang, H. C., & Huang, S. H. (1995). Application of neural network in manufacturing—a state of art survey. *International Journal of Production Research*, 33(3), 705–728.
52. Coit, D. W., Jackson, B. T., & Smith, A. E. (1998). Static neural network process models: Considerations and case studies. *International Journal of Production Research*, 36(11), 2953–2967.
53. Viharos, Zs. J., Monostori, L., & Markos, S. (1999). Selection of input and output variables of ANN-based modeling of cutting processes. *Proceedings of the 10th workshop on supervising and diagnostics of machining systems of CIRP, Poland* (pp. 121–131).
54. Kou, R. Y., & Cohen, P. H. (1998). Manufacturing process control through integration of neural network and fuzzy model. *Fuzzy Sets and Systems*, 15–31.

55. Kamatala, M. K., Baumgartner, E. T., & Moon, K. S. (1996). Turned surface finish prediction based on fuzzy logic theory. In Proceedings of the 20th international conference on computer and industrial engineering, Korea: Vol. 1 (pp. 101–104).
56. Chen, Y. T., & Kumara, S. R. T. (1998). Fuzzy logic and neural network for design of process parameters: A grinding process application. *International Journal of Production Research*, 36(2), 395–415.
57. Hashmi, K., El Baradie, M. A., & Ryan, M. (1998). Fuzzy logic based intelligent selection of machining parameter. *Computers and Industrial Engineering*, 35(3–4), 571–574.
58. Ip, W. L. R. (1998). A fuzzy based material removal optimization strategy for sculptured surface machining using ball-nosed cutters. *International Journal of Production Research*, 36(9), 2553–2571.
59. Al-Wedyan, H., Demirli, K., & Bhat, R. (2001). A technique for fuzzy logic modelling of machining process. 20th NAFIPS international conference: Vol. 5 (pp. 3021–3026).
60. Shin, Y. C., & Vishnupad, P. (1996). Neuro-fuzzy control of complex manufacturing processes. *International Journal of Production Research*, 34(12), 3291–3309.
61. Chen, M. C., & Tsai, D. M. (1996). A simulated annealing approach for optimization of multi-pass turning operations. *International Journal of Production Research*, 34(10), 2803–2825.
62. Cakir, M. C., & Gurarda, A. (2000). Optimization of machining conditions for multi-tool milling operations. *International Journal of Production Research*, 38(15), 3537–3552.
63. Hui, Y. V., Leung, L. C., & Linn, R. (2001). Optimal machining conditions with cost of quality and tool maintenance for turning. *International Journal of Production Research*, 39(4), 647–665.
64. Kaker, R. N. (1985). Offline quality control, parameter design, and Taguchi's method (with discussion). *Journal of Quality Technology*, 17, 176–209.
65. Phadke, M. S. (1989). *Quality engineering using robust design*. New Jersey: AT&T Bells Laboratory/Prentice-Hall.
66. Ross, P. J. (1989). *Taguchi techniques for quality engineering*. New York: McGraw-Hill.
67. Unal, R., & Dean, E. B. (1991). Taguchi approach to design optimization for quality and cost: An overview. *Annual conference of the international society of parameter analysis* (pp. 1–9).
68. Youssef, A. Y., Beauchamp, Y., & Thomas, M. (1994). Comparison of a full factorial experiment to fractional and Taguchi's method in a lathe dry turning operation. *Computer and Industrial Engineering*, 27(1–4), 59–62.
69. Lin, T. R. (2002). Optimization techniques for face milling stainless steel with multiple performance characteristics. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 19, 330–335.

70. Singh, S., Shan, H. S., & Pradeep, K. (2002). Parametric optimization of magnetic field assisted abrasive flow machining by the Taguchi method. *Quality and Reliability Engineering International*, 18, 273–283.
71. Shaji, S., & Radhakrisnan, V. (2003). Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on Taguchi method. *Journal of Material Processing Technology*, 1–9.
72. Manna, A., & Bhattacharyya, B. (2004). Investigation for optimal parametric combination for achieving better surface finish during turning of Al/SiC-MMC. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23, 658–665.
73. Box, G. E. P. (1985). Discussion of offline quality control, parameter design, and Taguchi's method (with discussion) by R.N. Kaker. *Journal of Quality Technology*, 17, 189–190.
74. Carlyle, W. M., Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2000). Optimization problem and method in quality control and improvement. *Journal of Quality Technology*, 32(1), 1–17.
75. Box, G. E. P., & Wilson, K. B. (1951). On the experimental attainment of optimal conditions. *Journal of the Royal Statistical Society, B*, 13, 1–45.
76. Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiment* (5th ed.). New York: Wiley.
77. Taramen, K. (1974). Multi-machining output-multi independent variable turning research by response surface methodology. *International Journal of Production Research*, 12(2), 233–245.
78. Lee, Y. H., Shin, H. M., & Yang, B. H. (1996). An approach for multi-criteria simulation optimization with application to turning operation. *Computers and Industrial Engineering*, 30(3), 375–386.
79. Fuh, K., & Chang, H. (1997). An accuracy model for the peripheral milling of aluminum alloys using response surface design. *Journal of Materials Processing Technology*, 72, 42–47.
80. El-Axir, M. H. (2002). A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42, 1055–1063.
81. Carlyle, W. M., Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2000). Optimization problem and method in quality control and improvement. *Journal of Quality Technology*, 32(1), 1–17.
82. Del Castillo, E., & Semple, J. (2000). Discussion on 'Carlyle W. M., Montgomery D. C., Runger G., Optimization problem and method in quality control and improvement'. *Journal of Quality Technology*, 32(1), 20–23.
83. Hillier, F. S., & Liebermann, G. J. (1999). *Operations research* (2nd ed.). Delhi: CBS Publishers and Distributors.
84. Charner, A., & Cooper, W. W. (1963). Deterministic equivalents for optimizing and satisfying under chance constraint. *Operations Research*, 11, 18–39.

85. Hayers, G. M., & Davis, R. P. (1979). A discrete variable approach to machine parameter optimization. *AIIE Transactions*, 11(2), 155–159.
86. Sekhon, G. S. (1982). Application of dynamic programming to multi-stage batch machining. *Computer-Aided Design*, 14(3), 157–159.
87. Agapious, J. S. (1992a). An optimization of multi-stage machining system, part I: Mathematical solution part 2: The algorithm and application. *Transaction ASME, Journal of Engineering for Industry*, 114, 524–538.
88. Agapious, J. S. (1992b). The optimization of machining operation based on a combined criterion, part I: The use of combined objectives in singlepass operations. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 114, 500–507.
89. Agapious, J. S. (1992c). The optimization of machining operation based on a combined criteria, part II: Multi-pass operations. *Transactions ASME, Journal of Engineering for Industry*, 114, 508–513.
90. Prasad, A. V. S., Rao, R. K., & Rao, V. K. S. (1997). Optimal selection of process parameter for turning operation in CAPP system. *International Journal of Production Research*, 35(6), 1495–1522.
91. Chen, J. H., Lee, Y. S., & Fang, S. C. (1998). Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surface. *Journal of Manufacturing Systems*, 17(5), 371–388.
92. Markos, S., Viharos, Zs.J., & Monostori, L. (1998). Quality-oriented, comprehensive modelling of machining processes. *Sixth ISMQC IMEKO symposium on metrology for quality control in production* (pp. 67–74).
93. Voß, S. (2001). *Meta-heuristics: The state of art*. Lecture Notes in Computer Science, 2148, 1–23.
94. De Werra, D., & Hertz, A. (1983). Tabu search techniques. *OR Spectrum*, 131–141.
95. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computer and Industrial Engineering*, 13, 533–549.
96. Glover, F., & Laguna, M. (2002). *Tabu search*. London: Kluwer Academic Publisher (6th print).
97. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in nature and artificial system*. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.
98. Goldberg, D. E. (2002). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Boston, MA: Pearson Education Asia (5th print).
99. Deb, K. (2002). *Multi-objective optimization using evolutionary algorithm* (1st ed.). Chichester: Wiley.

100. Glover, F. (1989). Tabu search—part I. *ORSA Journal on Computing*, 1, 190–206.
101. Glover, F. (1990a). Tabu search—part II. *ORSA Journal on Computing*, 2(1), 4–32.
Glover, F. (1990b). Tabu search: A tutorial. *Interfaces*, 20, 74–94.
102. Kolahan, F., & Liang, M. (1996). An tabu search approach to optimization of drilling operations. *Computers and Industrial Engineering*, 31(1/ 2), 371–374.
103. Kirkpatrick, K., Gelett, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Sciences*, 220, 671–680.
104. Cerny, V. (1985). Thermodynamic approach to TSP: An efficient simulation algorithm. *Journal of Optimizing Theory and Application*, 45, 41–51.
105. Saravanan, R., Ashokan, P., & Sachithanandam, M. (2001). Comparative analysis of conventional and non-conventional optimization technique for CNC-turning process. *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 17, 471–476.
106. Chen, M. C., & Su, C. T. (1998). Optimization of machining conditions for turning cylinder stocks into continuous finish profiles. *International Journal of Production Research*, 36(8), 2115–2130.
- 107 Roy, Ranjit K.
Design Of Experiments Using The Taguchi Approach. 16 Steps to Product and Process Improvement
- 108 Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc., 2001. 538 p. Staff Of The Machinability Center Machining Data Handbook Volume, 3ra edición. Estados Unidos: Institute Of Advanced Manufacturing Sciences Inc., 1980. 2304 p.
- 109 Sitio web: <http://www.matweb.com/>
Consultado en octubre 2010
- 110 Sitio web: <http://www.mastercam.com/>
Compañía CNC Software, Inc.
- 111 Sitio web: <http://www.tesatool.com/>
Documento disponible en: http://tesatool.com/pdf_files/catalog_surface.pdf
Consultado noviembre 2010
- 112 Peace, Glenn Stuart. *Taguchi Methods: A Hands-On Approach*. Estados Unidos: Addison-Wesley Publishing Company, 1993. 522 p.
113. Ross, Phillip J. *Taguchi Techniques For Quality Engineering*. Estados Unidos: McGraw Hill, 1988. 279 p.
114. Tejedor, Francisco Javier. *Análisis de varianza: introducción conceptual y diseños básicos*. España: La Muralla, 1999. 132 p.