

01149



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

5

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERIA

**DEPFI**

EVALUACION DEL EFECTO DE DIVERSAS  
VARIABLES DE OPERACION EN EL MAQUINADO  
DE ALEACIONES ALUMINIO-SILICIO (<10%, PESO).

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
**MAESTRIA EN INGENIERIA**

**AREA: DISEÑO Y MANUFACTURA**

**P R E S E N T A :**

**ING. OSCAR ESPINOZA RANGEL**

DIRECTOR: DR. ARTURO BARBA PINGARRON



MEXICO, D. F.

ENERO, 2000.

273465



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

Agradezco a todas aquellas personas que participaron directa e indirectamente para la elaboración de este trabajo.

A mi asesor por brindarme el apoyo, paciencia y confianza para la culminación de este trabajo, así como a todos los representantes del jurado.

A mis familiares y amigos por sus consejos y orientación.

**A DIOS por brindarme la tenacidad para la culminación de este trabajo**

# ÍNDICE

## INTRODUCCION GENERAL

### CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1. Breve reseña histórica de los procesos de corte.	1
1.2. Procesos de maquinado.	3
1.2.1. Variables del proceso de maquinado.	5
1.2.2. Variables independientes del proceso de maquinado.	6
1.2.3. Variables dependientes del proceso de maquinado.	7
1.3. Geometría de las herramientas.	8
1.3.1. El ángulo de incidencia $\alpha$ .	9
1.3.2. El ángulo de la herramienta $\beta$ .	9
1.3.3. El ángulo de corte $\gamma$ .	9
1.3.4. El ángulo de inclinación $\lambda$ .	10
1.3.5. El ángulo de posición $k$ .	11
1.3.6. Combinación de ángulos.	13
1.3.6.1. Angulos de corte radial y axial positivos	13
1.3.6.2. Angulo de corte radial positivo con ángulo de corte axial negativo	14
1.3.6.3. ángulo de corte radial negativo con ángulo de corte axial positivo.	15
1.3.6.4. Angulos de corte radial y axial negativos.	15
1.4. Tolerancias geométricas	16
1.4.1. Tolerancias de forma, perfil, orientación y cabeceo	16
1.4.2. Tolerancias de localización	21

### CAPÍTULO II. CONDICIONES DE CORTE PARA EL MAQUINADO DE ALUMINIO

2.1. Introducción	24
2.2. Maquinabilidad	24
2.2.1. Factores que influyen en la maquinabilidad.	26
2.3. Parámetros de corte	26
2.3.1. Condiciones de maquinado.	27
2.3.1.1. Velocidad de corte.	28
2.3.1.2. Avance.	30
2.3.1.3. Profundidad de corte	30
2.3.1.4. Aceites de corte para el maquinado de aluminio	31
2.3.1.4.1. Problemas básicos con los solubles de corte	36

### CAPÍTULO III. MATERIALES DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADOS EN EL CORTE DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

3.1. Introducción	38
3.2. Características deseables de los materiales de las herramientas de corte	40
3.3. Materiales de las herramientas de corte	41
3.3.1. Aceros de alta velocidad (HSS)	41
3.3.2. Carburo de tungsteno	42
3.3.2.1. Fabricación del carburo	43
3.3.2.2. Clasificación de los carburos cementados	46
3.3.3. Diamante	47

3.3.3.1. Proceso de fabricación de diamante industrial	49
3.3.3.2. Herramientas de corte de diamante.	49
3.3.3.3. Fabricación de las herramientas de diamante.	50
3.3.3.4. Aplicaciones del diamante.	51
3.3.4. Herramientas de HSS con recubrimiento.	52
3.3.4.1. Ventajas importantes del recubrimiento.	54
3.4. Materiales de las herramientas comúnmente empleadas en el maquinado del aluminio.	55
3.4.1. Características de la construcción de insertos intercambiables	56

#### **CAPÍTULO IV. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL MAQUINADO DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.**

4.1. Introducción.	59
4.2. Criterios de desgaste en las herramientas	62
4.2.1. Generalidades	63
4.2.2. Desgaste y vida de las herramientas	64
4.2.3. Ambiente de desgaste	65
4.3. Mecanismos de desgaste de las herramientas de corte	70
4.3.1. Manifestaciones del desgaste de las herramientas.	74
4.4. Análisis del desgaste	75
4.4.1. Criterios de falla.	75
4.4.2. Formas de desgaste de las herramientas y la acción correctiva	76
4.4.3.1. Modelos de desgaste de herramientas	79

#### **CAPÍTULO V. EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

5.1. Introducción.	83
5.2. Evaluación de las características más relevantes en el maquinado del aluminio.	83
5.3. Estudio I. Planicidad	84
5.3.1. Desarrollo.	84
5.3.2. Resultados	88
5.4. Estudio II. la influencia del soluble de corte en el control de las tolerancias geométricas.	95
5.4.1. Desarrollo.	95
5.4.2. Resultados	97
5.5. Estudio III. Tipo de desgaste y vida útil de las herramientas.	99
5.5.1. Desarrollo.	100
5.5.2. Condiciones de maquinado.	102
5.5.3. Registros de la durabilidad de las herramientas.	105
5.3.3.1. Mecanismos de desgaste presentes en un formador	105
5.3.3.1.1. Tipo de desgaste y recomendaciones.	107
5.3.3.2. Mecanismos de desgaste presentes en las brocas de carburo	108
5.3.3.2.1. Tipo de desgaste y recomendaciones.	110
5.3.3.3. Mecanismos de desgaste presentes en los cortadores con insertos de diamante	111
5.3.3.3.1. Tipo de desgaste y recomendaciones.	114
5.3.3.4. Mecanismos de desgaste presentes en los escariadores de carburo.	115
5.3.3.4.1. Tipo de desgaste y recomendaciones.	116
5.3.4. Relación costo - beneficio en los procesos productivos.	117

#### **COMENTARIOS Y CONCLUSIONES**

#### **BIBLIOGRAFIA**

# INTRODUCCIÓN GENERAL

Las empresas que actualmente se dedican al maquinado de metales, emplean las más sofisticadas tecnologías en el ámbito mundial, entre otros: los centros de maquinado de CNC más versátiles y rápidos, las más avanzadas máquinas de medición por coordenadas, sistemas de verificación en las líneas de producción, tecnología de punta en el desarrollo de nuevos materiales y geometría de corte de las herramientas, etcétera. Así por ejemplo, la industria automotriz impone a sus proveedores, altas exigencias técnicas para que éstos cumplan tanto con alta calidad en los productos, precios bajos y competitivos y tiempos cortos de entrega.

Entre los metales más difíciles de maquinar se encuentran el aluminio y sus aleaciones, siendo éstos los materiales más comúnmente empleados en la industria automotriz. Con el fin de reducir al máximo el peso del motor, se busca que cada pieza posea la mínima cantidad de material posible, pero esto trae como consecuencia que las piezas se deformen al momento de sujetarlas en el dispositivo de maquinado, lo que trae como resultado que presenten problemas durante el proceso de maquinado y no se cumpla con las tolerancias geométricas especificadas en dibujo.

El planteamiento de este trabajo es establecer algunos principios básicos para el maquinado del aluminio y sus aleaciones. Se integra por cinco capítulos, en donde se muestran los diferentes aspectos que se presentan en los procesos de maquinado del aluminio, resaltando entre otras cosas, las características más importantes en los procesos de corte; el ángulo de corte, la generación de viruta, los mecanismos de desgaste de las herramientas, el empleo de los fluidos de corte, etc., con el fin de obtener los mayores beneficios durante el maquinado, englobando todas estas características técnicas en un sólo objetivo, mantener durante todo el tiempo de vida de un producto, la calidad total.

Es así pues que, en este trabajo no se pretende desarrollar una técnica o dar una "receta de cocina" para resolver todos los problemas que están íntimamente relacionados con el maquinado del aluminio y sus aleaciones, sin embargo se pretende brindar un amplio panorama de las características técnicas más importantes a controlar dentro de cualquier proceso productivo y proporcionarle al lector una opción mas para encontrar la solución a algunos de los problemas que se presentan mas recurrentemente dentro de las áreas productivas de modo que, todo esto sirva como apoyo técnico para todos aquellos Ingenieros de las áreas de Manufactura y Producción que se dedican al maquinado de piezas de aluminio. A partir de las reflexiones anteriores, este trabajo plantea dos objetivos:

El **primer objetivo**, es mantener bajo control la calidad total de las piezas durante los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones, estableciendo las condiciones de corte óptimas para el maquinado de las piezas, sustentándose este objetivo en tres estudios; (a) las tolerancias geométricas, (b) la influencia del soluble de corte durante el maquinado y (c) durabilidad de las herramientas de corte.

En el primer estudio, se analiza la variación de la planicidad de un múltiple de admisión de la superficie de ensamble al motor, como una de las tolerancias geométricas de mayor importancia y de las más difíciles de controlar en los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones en piezas que son especialmente delgadas. Así mismo, se compara la planicidad de esta misma pieza en dos máquinas que trabajan con el mismo producto y en las mismas condiciones de operación, destacando las variaciones entre ellas.

En el segundo estudio, se destaca la importancia del soluble de corte, no solo como un agente refrigerante y lubricante sino como un artículo de primera necesidad en los procesos de maquinado para lograr y mantener la calidad del producto. Para ello, se comparan dos fluidos de corte en condiciones similares de trabajo, y se evalúan los resultados de cada uno de ellos indicando claramente las ventajas y desventajas.

En el tercer y último estudio, se analizan los materiales más comunes de las herramientas de corte aplicadas en el maquinado del aluminio y sus aleaciones, tales como, carburo de tungsteno, herramientas de aceros de alta velocidad con recubrimientos de cromo duro, nitruro de titanio, etc. y las herramientas con insertos de diamante. Asimismo, se indica en qué casos es posible emplear estos materiales para las herramientas de corte, según el proceso de maquinado que se va a realizar y qué características debe poseer para obtener las mejores condiciones de corte, tales como, alta resistencia al

desgaste, alta resistencia al choque térmico, durabilidad, etc., y para finalizar, se analizan los mecanismos de desgaste a los que están sujetas las herramientas de corte según el proceso de maquinado y sus posibles acciones correctivas.

El **segundo objetivo**, es proporcionar al lector la información técnica necesaria para la toma de decisiones durante los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones, en la cual se enfatizan, los diferentes materiales de las herramientas de corte y su interacción con los solubles de corte, parámetros de corte y la duración de las herramientas.

En los dos primeros capítulos se proporciona la información necesaria para comprender el proceso de corte de materiales, así como una serie de recomendaciones para el control de las operaciones de corte en los procesos de maquinado, detallándose desde los aspectos más relevantes de la geometría de corte hasta los parámetros de corte empleados en el maquinado de aluminio y sus aleaciones.

El capítulo tres detalla las características de los materiales de las herramientas y los métodos de fabricación así como, su campo de operación y aplicación. Por último, el capítulo cuatro explica los aspectos relacionados con los mecanismos de desgaste de las herramientas empleadas en el maquinado de aluminio y sus aleaciones, así como algunas recomendaciones para minimizar el desgaste de las herramientas.



# Capítulo I

## ANTECEDENTES

### 1.1. BREVE RESEÑA HISTÓRICA DE LOS PROCESOS DE CORTE.

El propósito de este capítulo es hacer una breve reseña histórica de algunos de los acontecimientos más importantes que hasta la fecha se han investigado y difundido del proceso de maquinado de los materiales en general. Asimismo, proporcionar a lo largo de los demás capítulos la metodología para poder obtener un adecuado control en todos aquellos procesos en donde se involucra el maquinado de aluminio con bajo contenido de silicio.

Las investigaciones en el área de corte de metales empezaron aproximadamente 70 años después de la aparición de la primera máquina herramienta. Los primeros estudios de la mecánica de los procesos de corte, al parecer fueron realizados por el Investigador Cocquilhat<sup>I</sup> en 1851, en los cuales encauzó sus investigaciones a determinar todos aquellos aspectos que se requerían para eliminar el excedente de material dentro del proceso de barrenado, utilizando primordialmente hierro, bronce, piedra y algunos otros materiales. Otro investigador francés, Joessel<sup>II</sup> publicó en el año de 1864 uno de los más relevantes estudios realizados en aquella época sobre el proceso de maquinado, en donde hacía hincapié de la influencia que tenía la geometría de la herramienta en las fuerzas de corte. En el año 1870 el investigador Ruso Thime<sup>III</sup> efectuó los primeros estudios sobre el proceso de formación de la viruta. En su análisis, él consideró que la viruta se formaba a partir de planos sucesivos ocasionados por el filo de corte de la herramienta de corte, desplazándose desde la punta hasta el momento que ésta se desprendía de la herramienta. El famoso ingeniero Francés Tresca<sup>IV</sup>, en el año de 1877, puntualizó que la viruta era solamente 1/2 a 1/3 de la longitud del corte, así él postuló que existían algunos mecanismos de compresión que estaban involucrados y por lo mismo sugirió que el corte del material se presentaba dentro de un plano oblicuo justo enfrente de la punta de la herramienta.

En el año de 1881 el científico Inglés Mallock<sup>V</sup>, elaboró un cuidadoso estudio del proceso de formación de la viruta, puliendo y marcando parcialmente la rebaba formada. Su investigación lo llevó a

concluir que la deformación del material era ocasionada principalmente por las fuerzas de corte, influenciado también por la geometría de las herramientas durante el proceso de corte. Él es considerado como el pionero en la aplicación del primer fluido de corte durante el proceso de maquinado. La incorporación de una solución jabonosa mejoró directamente la superficie de corte y ayudó a reducir la fuerza de fricción en la superficie de la herramienta. Al incorporar el fluido dentro de los procesos de corte permitió decrementar los ángulos de corte de las herramientas y obtener mejores resultados dentro del proceso.

Posteriormente, en el año de 1900 el científico Reuleaux<sup>VI</sup> publicó en sus estudios que al formarse la viruta se creaba una grieta enfrente de la herramienta y enseguida de ésta, la viruta llegaba a la temperatura del rojo cereza. Además observó que la herramienta se encontraba en excelentes condiciones en las aristas de corte, pero se formaba una pequeña zona de desgaste a una corta distancia de la cara de corte. Él atribuyó éste fenómeno de formación de la viruta, al hecho de que el metal estaba formado por capas similares a la estructura de la madera. Este concepto se maneja así por mucho tiempo, mientras los estudiosos disculpan esta teoría, el trabajo de Reuleaux era ampliamente aceptado y por algún tiempo se consideró que el proceso de corte de los metales y el de la madera se realizaban de la misma manera.

A inicios del Siglo XX, los trabajos efectuados por el investigador F.W. Taylor<sup>VII</sup>, en los Estados Unidos de América, culminaron con un sobresaliente adelanto de la teoría de los procesos de corte, teniendo un gran impacto en el desarrollo práctico del maquinado. Su trabajo se concentró específicamente en el desgaste y la duración de las herramientas de corte. Todo hace pensar que éste fue el primer documento completo en el cual se resalta concretamente la influencia de la temperatura durante el desgaste de las herramientas. Asimismo, desarrolló un modelo matemático que relaciona la vida de la herramienta y la velocidad de corte, la cual es aun utilizada como base para determinar la vida de las herramientas. Una de las mayores contribuciones de Taylor fue el estudio que efectuó con diferentes materiales para determinar la duración de las herramientas incluyendo las herramientas de aceros de alta velocidad (HSS).

El científico Resenhain<sup>VIII</sup> en el año de 1906 y posteriormente con Stumey en 1925 publicaron los resultados de un minucioso estudio de microscopía óptica de una rebaba pulida y de las marcas que se mostraba de forma parcial. Ellos encontraron que la formación de la viruta variaba dependiendo del material que se estaba trabajando y de las condiciones de corte. Sus estudios los llevaron a clasificar la generación de viruta en tres diferentes tipos: viruta en forma de gotas, la cual era formada periódicamente por el rompimiento más allá de la punta de la herramienta; la viruta de tipo cortante, la cual era una viruta semicontinua; y la viruta de flujo o continua y larga.

Por otro lado, dos científicos Ingleses Coker<sup>IX</sup> y Chakko en 1922 y más tarde Coker<sup>X</sup> en 1925 publicaron un estudio sobre la distribución de esfuerzos dentro de la pieza utilizando el método de fotoelasticidad. Las pruebas efectuadas por ambos científicos consistieron en el maquinado de celulosa a

bajas velocidades de corte para estudiar los esfuerzos en la pieza, empleando el método de fotoelasticidad en el material de la herramienta. Después de su estudio concluyeron que la formación de la viruta era un proceso de corte en una zona muy próxima a un plano.

El más extenso estudio logrado dentro del análisis de corte de metales se realizó entre los años de 1938 a 1944 efectuado por un grupo de científicos que trabajaban para la firma de la Compañía de Cincinnati Milling Machine. El líder de este proyecto fue un australiano Hans Ernst. En el año de 1935 Ernst junto con Martellotti<sup>xj</sup> hicieron del conocimiento de los demás científicos el proceso de formación de la viruta, y de igual manera mostraron el desgaste de filos recrecidos (material adherido al filo de la herramienta durante el proceso de corte) que se presentaban en las herramientas de corte. Posteriormente, en el año de 1938, Ernst investigó concienzudamente todos los tipos de formación de viruta, seguido después en el año de 1940 y 1941 por el científico Merchant<sup>xii</sup> con un análisis de la geometría de la formación de la rebaba y sus efectos en el producto final. Ya en 1943 Kronenberg<sup>xiii</sup> que entonces trabajaba para la firma de Cincinnati descubrió la influencia de la geometría de la herramienta en el acabado de la pieza. Y en el año de 1944 y 1945 Merchant<sup>xiv</sup> presentó un elaborado estudio de los mecanismos de corte, en los cuales efectivamente se ponían de manifiesto mediante un análisis matemático básico todos los procesos de corte de metales. Su estudio consistió esencialmente en formular un modelo del proceso y un análisis completo en función de la geometría y de las condiciones de esfuerzos y deformación. Desde entonces se han realizado una gran variedad de estudios e investigaciones, y se han escrito cientos de documentos, pero los puntos señalados en los estudios efectuados por Merchant son sumamente simples y aunque no pueden justificar todo el análisis del proceso de corte, todavía están como la piedra angular en el desarrollo de este campo. Básicamente, su estudio se sustenta en las siguientes suposiciones: primero, el análisis realizado se aplica en términos generales para un gran rango de condiciones de corte; y segundo, esto tiene una simulación posterior del trabajo para representar la suposición en la cual el modelo está basado.

## 1.2. PROCESOS DE MAQUINADO

El término maquinado es un concepto que cubre una gran cantidad de procesos de manufactura desarrollados para eliminar el material no deseado, regularmente en forma de viruta. El maquinado es utilizado para convertir el material obtenido mediante otros procesos como la fundición, forja, material de stock, etc., a la forma deseada cumpliendo con las especificaciones y tolerancias de diseño. Casi todos los productos ensamblados requieren de componentes maquinados, frecuentemente de gran precisión. Por lo tanto, el proceso de maquinado es uno de los procesos de manufactura básicos y en la actualidad de gran importancia, ya que proporciona el valor agregado al producto final. Por tal motivo, los procesos de maquinado son de los más caros y laboriosos dentro del proceso de fabricación.

La mayoría de los procesos de maquinado de la industria se realizan con materiales metálicos. Aunque el proceso de corte de metales tiene cierta resistencia al análisis teórico porque es muy complejo, la aplicación de estos procesos ha sido difundida ampliamente en la industria.

Los procesos de maquinado son ampliamente aplicados en una gran variedad de máquinas herramientas, las piezas están sujetas dentro de la máquina mediante mordazas o dispositivos especiales de sujeción, y en el caso de los tornos, están colocadas mediante mordazas o boquillas de sujeción. Asimismo, para el caso de los tornos las herramientas están colocadas en el revólver o torreta y para los centros de maquinado están colocadas dentro de un sistema especial. Es importante resaltar que estos sistemas de sujeción de herramientas varían de acuerdo al fabricante, es decir, algunos emplean una torreta giratoria, otros emplean un almacén de herramientas, otros sistemas de carrusel, etcétera, esto depende básicamente de la velocidad que se requiera para el cambio de herramienta, de la cantidad de herramientas que se requiera para efectuar todo el proceso de maquinado de la pieza, etc. Dentro de todos los sistemas altamente productivos, este factor es de suma importancia para reducir el tiempo de maquinado de la pieza.

Los procesos principales para la formación de la viruta se listan enseguida, con algunas versiones alternativas entre paréntesis. Cada proceso se realiza dentro de una o más máquinas herramientas. Por ejemplo, un centro de maquinado puede tener incorporados los procesos de barrenado, formado, mandrilado, rimado, etc.

- Torneado (mandrilado, careado, tronzado, etc.)
- barrenado.
- Machueleado (formado)
- Fresado (honeado, roscado)
- Cortado (sierra cinta)
- Rectificado mediante ruedas abrasivas
- Brochado

Los anteriores procesos pueden combinarse en función de la capacidad de la máquina y de las herramientas empleadas. Esto se facilita en los centros de maquinado ya que son capaces de ejecutar cualquier proceso contando con el herramental necesario. La velocidad y posición de las herramientas están controladas mediante un sistema de control con retroalimentación. Las herramientas pueden ser colocadas en el husillo automáticamente, de manera confiable y logrando una alta repetibilidad en la posición de la misma.

Para cada tipo de centro de maquinado existen diferentes tipos de dispositivos de sujeción de las piezas, diversos herramientas, diferentes portaherramientas, dando como resultado un mundo de posibilidades para el maquinado de pieza.

### 1.2.1. VARIABLES DEL PROCESO DE MAQUINADO

Los procesos de corte de metales pueden ser analizados como un conjunto de variables independientes, variables dependientes y un híbrido de éstas. Dentro de cualquier proceso de maquinado el responsable del proceso puede controlar las variables de entrada y especificar o seleccionar todos los parámetros necesarios cuando se inicia un proceso de maquinado. Enseguida se muestra una descripción somera de cada una de las variables de proceso y se esquematiza en la figura 1.1.

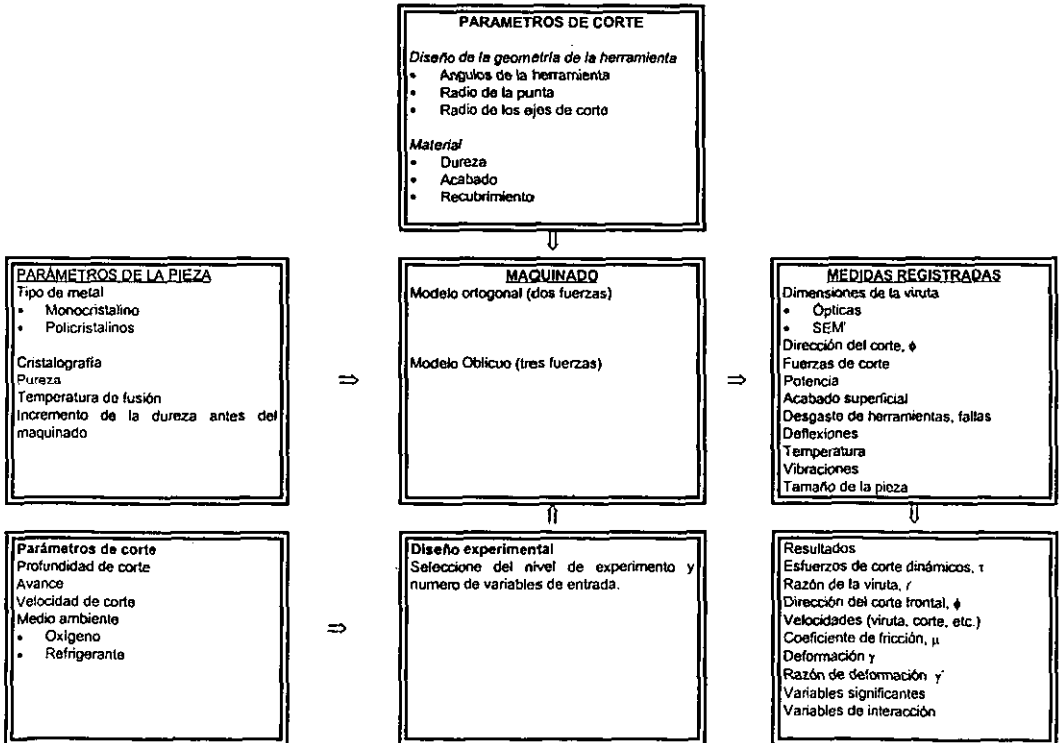


Figura 1.1 Esquema de las variables del proceso de maquinado con sus entradas y salidas\*

<sup>1</sup> Microscopio electrónico de barrido

<sup>2</sup> Metals Handbook, "Introduction to Machining Process", Pag 3, 1989, volumen 16

## 1.2.2. VARIABLES INDEPENDIENTES DEL PROCESO DE MAQUINADO

Las variables independientes de los procesos de maquinado se clasifican en:

**El material de trabajo.** Es importante conocer la metalografía y las propiedades químicas del material que se va a utilizar. Regularmente la selección del material se realiza para una aplicación especial buscando que se cumplan todas las condiciones físico - químicas de diseño.

**Geometría de la pieza.** La forma de la pieza y la estructura física influyen decisivamente en el proceso de fabricación de la parte determinando desde el sistema de sujeción de la pieza (hidráulico o neumático) y la posición del apoyo y el pisador hasta el proceso de maquinado.

**Especificaciones del proceso de maquinado.** En la selección del proceso de maquinado es requisito indispensable para transformar la materia prima en un producto terminado conocer la geometría de la pieza, identificar los acabados y tolerancias geométricas críticas para lograr la calidad del producto, determinar la manera de sujetar la pieza para mantener la calidad durante todo el periodo de vida del proyecto, seleccionar la máquina que cumpla con las tolerancias geométricas especificadas, etc. Los procesos de maquinado están agrupados en tres grandes categorías:

- a) **Procesos de formación de rebaba.** Los procesos básicos de formación de viruta son torneados, machueleado, fresado, barrenado, corte con sierra y brochado.
- b) **Maquinado mediante abrasivos.** Es un proceso básico de maquinado en el cual la viruta se forma mediante pequeños ejes de corte que conforman las partes de las partículas abrasivas.
- c) **Procesos de maquinado no tradicionales.** Estos procesos de maquinado involucran la formación de la pieza mediante el uso de alto consumo de energía, alta presión de agua, electroerosión, corte por laser, etc. presentando un número inherente de ventajas tales como corte con precisión, cortes de formas caprichosas, corte de metales muy duros, etc., sin embargo presenta una serie de desventajas, entre ellas: altos costos por el uso de energía, distorsión por altas temperaturas, esfuerzos residuales, limitaciones dimensionales de la pieza, etc.

**Material de la herramienta.** Los tres tipos de materiales de las herramientas de corte comúnmente empleados en los procesos productivos del maquinado de aluminio con bajo contenido de silicio son el acero de alta velocidad (HSS) con algún recubrimiento, el carburo de tungsteno y las herramientas de diamante. Actualmente, las herramientas de acero rápido son recubiertas con nitruro de titanio y carburo de titanio. Por lo general las herramientas de HSS y de carburo son empleadas para maquinados moderados o para herramientas muy complejas. Aunque los materiales policristalinos (PKD) son extremadamente duros gracias a los grandes adelantos que existen en los procesos de corte de diamante se comienzan a elaborar herramientas muy complejas con este material. El

diamante al igual que el CBN<sup>iii</sup> se emplea en los procesos productivos en donde se requieren muy altas velocidades de corte.

**Parámetros de corte.** En cada operación de maquinado es necesario seleccionar la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, pero existen muchos factores intrínsecos que durante el proceso de maquinado limitan estas decisiones, porque todas las variables independientes están influenciadas por ellos. La propia selección de estas variables también está influenciada por otras variables que tienen que ser seleccionadas, como son la cantidad de material a remover, el material de la pieza, el material de la herramienta y el proceso o procesos de maquinado involucrados, tipo de fundición, etc.

**Geometría de las herramientas.** Las herramientas de corte están diseñadas regularmente para realizar una operación determinada y así la geometría de la herramienta (ángulos de corte) es seleccionada para realizar determinadas operaciones. Por lo general, grandes ángulos de ataque y de salida son deseados, pero esto solamente se puede emplear en herramientas de aceros rápidos (HSS). Las herramientas fabricadas con carburo, diamante, etc., requieren pequeños ángulos de corte, para evitar la fractura y la falla de la herramienta durante su operación. Para maquinados de gran precisión se requieren la mejor geometría de los ejes de corte.

**Fluidos de corte.** La selección del fluido de corte correcto para una combinación especial de material de la pieza y el proceso de maquinado, así como material de la herramienta puede ser la diferencia entre su buena funcionalidad y/o la falla dentro del proceso. Las funciones principales de los fluidos de corte son: enfriar la pieza de trabajo, enfriar la herramienta, enfriar la viruta, reducir la fricción y lubricar durante la operación, sacar la viruta de la zona de corte, mejorar el acabado superficial y proteger la superficie maquinada.

### 1.2.3. VARIABLES DEPENDIENTES DEL PROCESO DE MAQUINADO.

Las variables dependientes más importantes son la fuerza y potencia de corte, los esfuerzos y el tamaño y propiedades del producto final, acabado superficial, desgaste y falla de las herramientas.

**Fuerza y potencia de corte.** El maquinado de metales involucra la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte, las cuales junto con el tipo de soluble, geometría de las herramientas y material de las mismas, determinan generalmente el consumo de potencia y las fuerzas de corte. Un cambio en cualquiera de esas variables altera la magnitud de las fuerzas de corte y el consumo de potencia, sin embargo no existe ningún factor de proporcionalidad en los cambios efectuados entre los parámetros de corte y el consumo de potencia de la máquina. La determinación de las fuerzas es importante ya que de ellas dependen el desgaste de las herramientas, la forma y el sistema de sujeción de la pieza, lo cual juega un papel preponderante para el acabado final de la pieza.

---

<sup>iii</sup> CBN es Carbonitrato de boro

**Tamaño y propiedades del producto final.** En la actualidad, el objetivo del maquinado es obtener una superficie que cumpla con los requerimientos de calidad y tolerancias geométricas, y de igual manera obtener las propiedades mecánicas deseadas, ya que el maquinado solamente se realiza en áreas específicas. Es por ello que está sujeto a una deformación plástica y cada superficie maquinada puede estar sometida a esfuerzos residuales. Estos esfuerzos son generalmente de tensión y pueden interactuar con la superficie plana produciendo fallas por fatiga o causando corrosión o en su defecto complicando todo el proceso de maquinado.

**Acabado superficial.** El acabado superficial dentro de una zona maquinada depende de la geometría de la herramienta, el material de la herramienta, el material de la pieza, el proceso de maquinado, la velocidad de corte, el avance, la profundidad de corte, el fluido de corte y en algunos casos del tipo de sujeción. Existen dos maneras de lograr el acabado superficial cumpliendo tanto con el perfil y la rugosidad especificada en los planos de maquinado, la primera es realizar múltiples cortes hasta lograr el acabado deseado y la segunda es emplear diferentes procesos de corte hasta conseguir el acabado superficial.

**Desgaste de las herramientas y sus principales fallas.** La deformación plástica y la fuerza de fricción inherente al proceso de maquinado generan una gran cantidad de calor, lo cual incrementa la temperatura en la herramienta y provoca que baje su resistencia al desgaste. Conforme la herramienta se va desgastando va cambiando tanto su geometría como su tamaño, ocasionando así una variación en los ejes de corte, tornándolos pasivos e incrementando la fuerza al momento del maquinado, ocasionando además un aumento en el consumo de potencia e incremento de la temperatura de operación llegando en algunas ocasiones a provocar un acelerado desgaste en la herramienta.

### 1.3. GEOMETRÍA DE LAS HERRAMIENTAS

En la actualidad, las herramientas de corte juegan un papel crucial dentro de la productividad, ya que dependiendo de su geometría, material y sus parámetros de corte pueden representar un serio problema en las áreas productivas afectando directamente tanto el costo del producto como la calidad del mismo. Las herramientas de corte representan un mínimo pero importante porcentaje del costo del producto, es por ello que las empresas buscan la manera de reducir estos gastos en función de la duración de la herramienta y en ello va implícito el empleo de los adecuados parámetros de corte, solubles de corte y básicamente la geometría de las herramientas.

Como se mencionó en la sección 1.1, en el estudio de Mallock, la importancia de la geometría de las herramientas en los procesos de maquinado, también podemos particularizar los conceptos y ángulos de corte estandarizados dentro del fresado. Representados por la ecuación 1.1.<sup>iv</sup>

---

<sup>iv</sup> Hertel. "Manual de operaciones", Relación Geométrica



$$\alpha + \beta + \varphi = 90^\circ$$

1.1.

En donde:

$\alpha$  es el ángulo de incidencia.

$\beta$  es, el ángulo de la herramienta.

$\varphi$  es  $\gamma$  y el ángulo de corte.

### 1.3.1. EL ÁNGULO DE INCIDENCIA $\alpha$

El ángulo de incidencia  $\alpha$  varía normalmente entre  $6^\circ$  y  $10^\circ$ . Es necesario mencionar que mientras el ángulo de incidencia tienda a ser más grande, entonces el desgaste de los filos de corte de la herramienta es más lento, y en caso contrario, cuando el ángulo de incidencia es más pequeño aumenta la fuerza de penetración. Por tanto, la selección del ángulo  $\alpha$  depende de varios factores entre ellos, el material a maquinarse, del avance por diente  $f_z$  ajustado y del diámetro de la fresa. Los grandes ángulos de incidencia son idóneos para el fresado de materiales blandos, tales como aluminio, bronce, latón, etc., y en el caso de los materiales más duros se recomienda emplear ángulos de incidencia más pequeños.

### 1.3.2. EL ÁNGULO DE LA HERRAMIENTA $\beta$

El ángulo de la herramienta  $\beta$  se selecciona tan grande como sea posible, ya que entre otras cosas, este ángulo impide la posibilidad de rotura del inserto o de la herramienta, proporcionando estabilidad a la cuña de corte durante el maquinado. Este ángulo puede ser reforzado mediante bisel de desprendimiento y desafilado de los filos de corte.

### 1.3.3. EL ÁNGULO DE CORTE $\gamma$

En el caso de los ángulos de corte tenemos la posibilidad de seleccionarlos positivos o negativos.

$\gamma$  es positivo si  $(\alpha + \beta) < 90^\circ$

$\gamma$  es negativo si  $(\alpha + \beta) > 90^\circ$

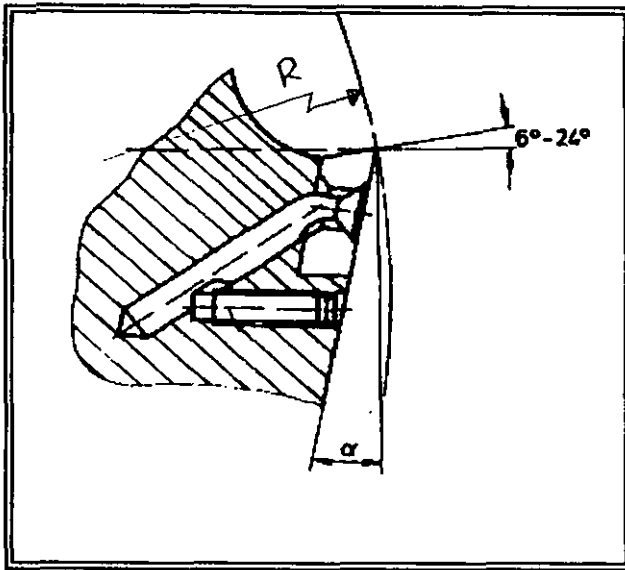


Figura 1.2. Se muestra el radio R de operación de la herramienta así como el intervalo del ángulo de desahogo\*

Los ángulos de corte positivos, particularmente en los cortadores, facilitan la evacuación de la viruta y disminuyen las fuerzas de corte, aprovechando con ello mejor la potencia de accionamiento de la máquina, como se muestra en la figura 1.2.

Los ángulos de corte negativos se emplean por regla general para fresar materiales de virutas cortas. En materiales de virutas largas ocasionan un marcado representativo de las virutas contra la pieza. Con ángulos negativos se tiene una cuña de corte<sup>ii</sup> estable, sin embargo las fuerzas de corte son muy grandes.

#### 1.3.4. EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN $\lambda$

El ángulo de inclinación  $\lambda$  se puede seleccionar tanto como un ángulo de corte positivo como negativo y según su tamaño éste influye en la componente de fuerza axial, como se puede ver en la figura 1.3. Con el ángulo de inclinación correcto se disminuyen la carga a la que está sometido el filo de la herramienta al iniciarse el corte. Los ángulos de inclinación positivos favorecen la evacuación de las virutas, sin embargo, dan lugar a una mayor carga en las aristas de corte.

\* Hertel. "Manual de operaciones"

<sup>ii</sup> Cuña de corte, es la forma que presenta la herramienta para facilitar el desalojo de la viruta

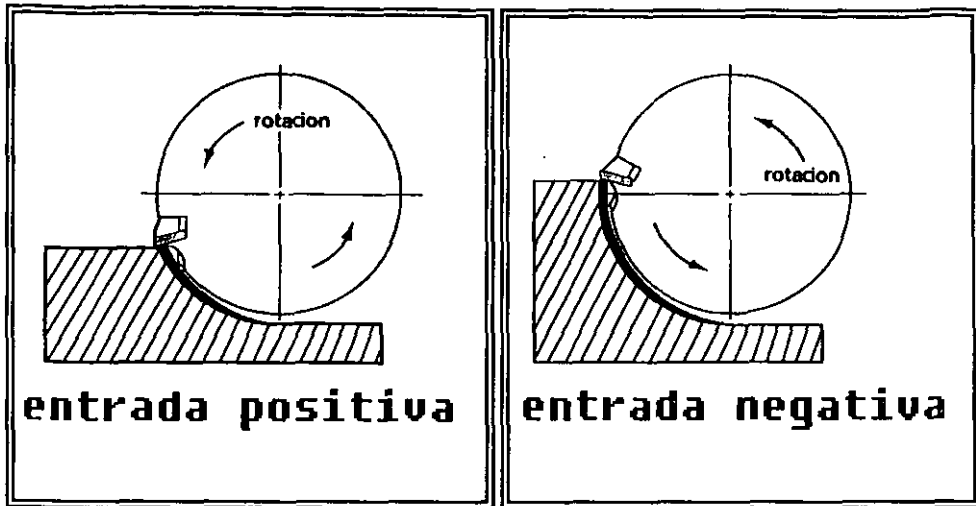


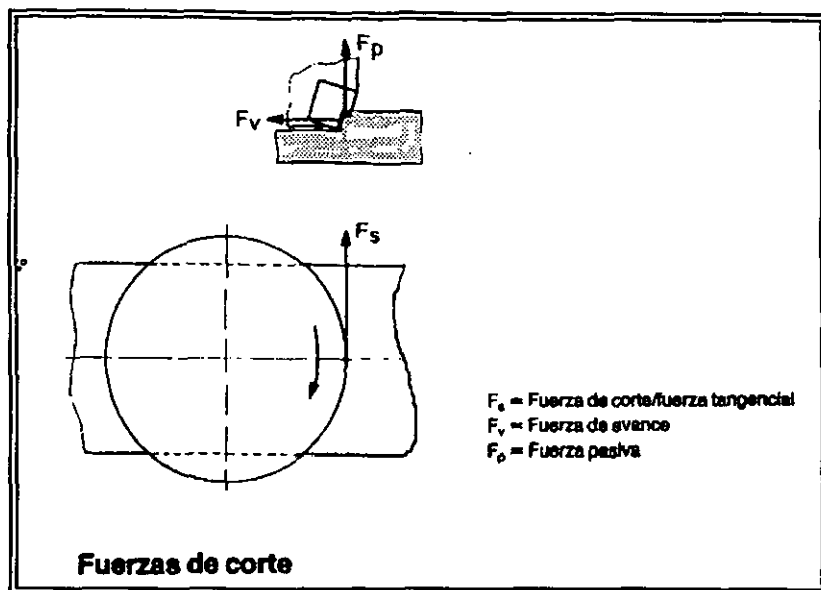
Figura 1.3. Muestra las dos posibilidades de la herramienta de corte al iniciar el corte<sup>vii</sup>.

### 1.3.5. EL ÁNGULO DE POSICIÓN $K$

El ángulo de posición  $k$  tiene gran influencia sobre el maquinado, así como la tienen el avance  $fz$ , el espesor de viruta  $h$  y las fuerzas de corte o fuerza tangencial  $F_s$ ; fuerza de avance  $F_v$ ; y la fuerza pasiva  $F_p$ , como se puede observar en la figura 1.4. A medida que  $k$  va disminuyendo se reduce el espesor de viruta  $h$  en la relación de  $fz \cdot \text{sen } k$ . Dado que a medida de que se va reduciendo el espesor de la viruta va aumentando las fuerzas específicas de corte, también aumenta la fuerza de maquinado y la potencia de accionamiento necesaria.

Además, el ángulo de posición modifica la relación de la fuerza pasiva hacia la fuerza de avance con respecto a su magnitud y sentido, e incrementa los esfuerzos ejercidos sobre el husillo portaherramientas. A medida que disminuye  $k$ , la fuerza pasiva va aumentando más que la fuerza de avance; la relación entre  $F_p/F_v$  aumenta y la carga sobre el husillo portaherramientas resulta más ventajosa (los husillos portaherramientas se caracterizan por tener su mejor rigidez en sentido axial, por lo cual se prestan mejor para absorber esfuerzos axiales).

<sup>vii</sup> Hertel. "Manual de operaciones"

Figura 1.4. esquematiza las fuerzas de corte <sup>viii</sup>

Las fresas frontales con  $k=90^\circ$  son fresas de escuadrar. Aquí se presentan circunstancias relativamente desfavorables al corte, ya que las cargas en el filo del inserto son elevadas y el espesor de la viruta es grueso, afectando por lo mismo a la fuerza de avance  $F_v$ . Cuando la relación de  $F_v/F_p$  se incrementa provoca una tendencia a la vibración en el husillo portaherramientas lo cual es bastante desfavorable para el proceso de corte. De ahí que las fresas de escuadra convenientemente se empleen únicamente para trabajar piezas con contornos rectangulares.

Las fresas frontales con  $k$  menor a  $90^\circ$  son fresas de planear. Los ángulos de posición corrientes son:  $75^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $45^\circ$  en las cuales se puede apreciar en la figura 1.5. las diferentes fuerzas de corte a las que se encuentra sujeta dependiendo el ángulo. En este aspecto hay que considerar que, a medida que disminuye  $k$ , quedando igual  $S_z$ , disminuye el espesor  $h$ , es decir, las virutas son cada vez más finas y anchas. Esto es importante en el fresado de piezas de hierro fundido, donde hay que mantener el espesor de viruta reducido, para impedir que se desprendan partes de la pieza. Las fresas de planear donde  $k = 60^\circ$  y menor también es muy apta para máquinas de taladrar y de fresar con el husillo en voladizo. Debido a la relación favorable de  $F_p/F_v$  el husillo portaherramientas tiende a vibrar menos.

<sup>viii</sup> Hertel. "Manual de operaciones"

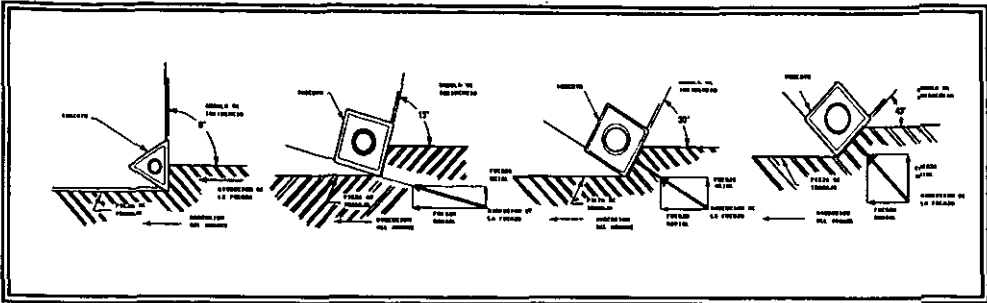


Figura 1.5. Esquematiza las diferentes magnitudes de las proyecciones de las fuerzas en función del ángulo de operación de la herramienta.<sup>ix</sup>

### 1.3.6. COMBINACIÓN DE ÁNGULOS

Durante el fresado de superficies planas, se emplean cortadores con insertos intercambiables de metal duro o insertos de diamante, teniendo las siguientes posibilidades de combinación en la relación del ángulo de corte radial  $\phi_x$  al ángulo de corte  $\phi_y$ .

#### 1.3.6.1. ÁNGULOS DE CORTE RADIAL Y AXIAL POSITIVOS.

En este tipo de combinaciones se presenta una relación directa entre los ángulos y las fuerzas, es decir, cuando los ángulos de corte son positivos, las fuerzas de corte son pequeñas, como se indica en la figura 1.6. Sin embargo, la cuña de corte se debilita con la misma operación, por lo cual el rendimiento de maquinado es muy bajo. Al fresar materiales de virutas largas se forma virutas en espiral, y esto permite una segura evacuación de virutas. La compresión de la viruta es muy pequeña y se presenta una superficie de contacto favorablemente pequeña entre las mismas virutas y los insertos intercambiables. Esta combinación de ángulos se aplica con frecuencia para maquinar materiales blandos, en donde es posible que las superficies se solidifiquen relativamente rápido.

<sup>ix</sup> Kenametal, "Manual de capacitación"

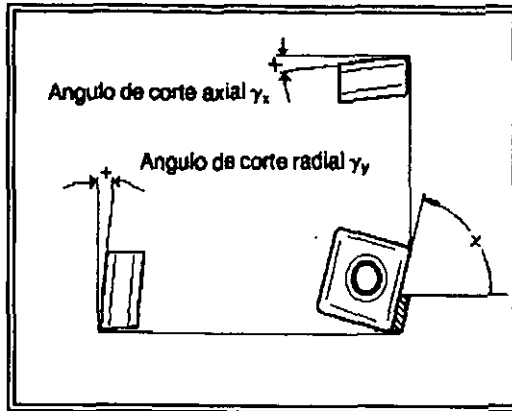


Figura 1.6. Muestra la combinación del ángulo radial y axial positivos en sus tres caras\*.

### 1.3.6.2. ÁNGULO DE CORTE RADIAL POSITIVO CON ÁNGULO DE CORTE AXIAL NEGATIVO.

En esta combinación podemos apreciar que los cortadores que se emplean para fresar superficies con esta combinación de ángulos tienen los filos estables, como se indica en la figura 1.7. Aquí también se forman virutas en espiral que fácilmente salen de la zona de maquinado.

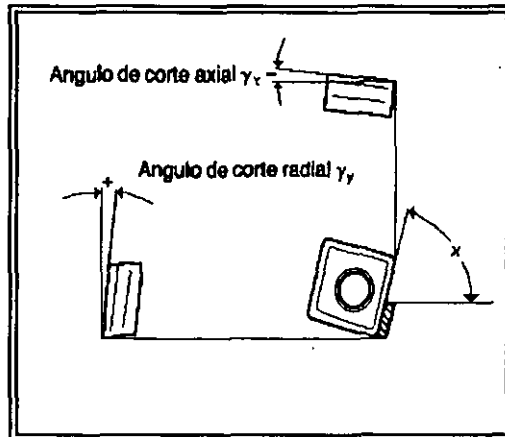


Figura 1.7. Indica la combinación del ángulo radial positivo y el axial negativo.<sup>xi</sup>

\* Hertel. "Manual de operaciones"

<sup>xi</sup> Hertel. "Manual de operaciones"

### 1.3.6.3. ÁNGULO DE CORTE RADIAL NEGATIVO CON ÁNGULO DE CORTE AXIAL POSITIVO.

Esta combinación de ángulos por regla general se prefiere en los cortadores que se colocan en un husillo que prácticamente no se mueve. Junto con la fijación por tornillo y bulón e insertos en posición vertical, se presentan circunstancias estables aun cuando se tienen las mayores fuerzas de maquinado. Por el ángulo de corte radial negativo, la arista de corte se somete a cargas menores. Los ángulos de corte axiales positivos garantizan fuerzas de corte menores ofreciendo el aprovechamiento óptimo de la potencia existente de la máquina. Se forman virutas en espiral que fácilmente y sin obstrucción, salen de la zona maquinada. En la figura 1.8. se muestra esta combinación.

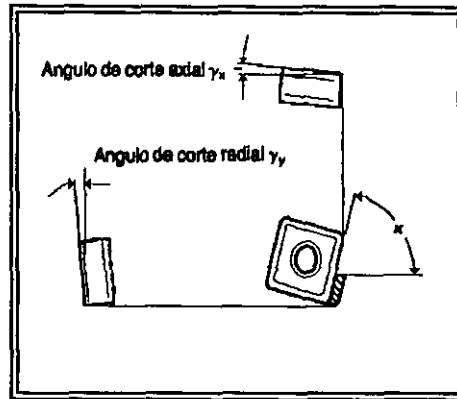


Figura 1.8. Muestra la combinación del ángulo de corte negativo y el ángulo axial positivo.<sup>ii</sup>

### 1.3.6.4. ÁNGULOS DE CORTE RADIAL Y AXIAL NEGATIVOS.

Esta combinación da como resultado filos más estables durante el maquinado. Sin embargo, las fuerzas de corte son mayores. Tales fuerzas durante el fresado se emplean para el desbastado (hierro fundido). Esta combinación de ángulos no se presta para materiales blandos y materiales en donde se generen unas virutas largas debido a la compresión relativamente alta de las virutas con la superficie de contacto. La figura 1.9. muestra esta combinación.

<sup>ii</sup> Hertel. "Manual de operaciones"

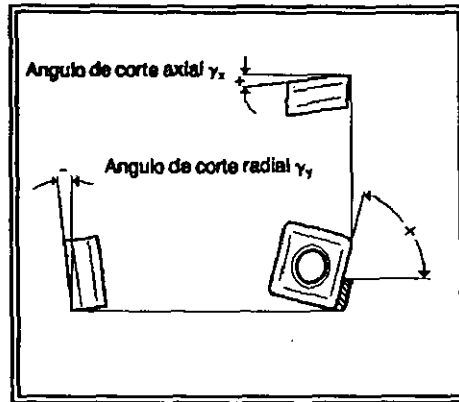


Figura 1.9. Muestra las posiciones del inserto con ambos ángulos radial y axial negativos.<sup>iii</sup>

## 1.4. TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS

Las tolerancias geométricas se dividen principalmente en dos grupos:

### 1.4.1. TOLERANCIAS DE FORMA, PERFIL, ORIENTACIÓN Y CABECEO

Las tolerancias de forma controlan rectitud, planitud, redondez y cilindricidad. Las tolerancias de orientación controlan angularidad, paralelismo y perpendicularidad. Las tolerancias de perfil controlan como su nombre lo dice, el perfil de una parte y por último las tolerancias de cabeceo controlan la forma mediante la rotación alrededor de un eje.

**Rectitud.** La rectitud es una condición en la que un elemento de una superficie, o un eje es una línea recta. La tolerancia de rectitud especifica una zona de tolerancia, dentro de la cual el elemento considerado o línea media derivada debe encontrarse. Una tolerancia de rectitud es aplicada en la vista en la que los elementos a ser controlados están representados mediante una línea recta, como se muestra en la figura 1.10

<sup>iii</sup> Hertel. "Manual de operaciones"



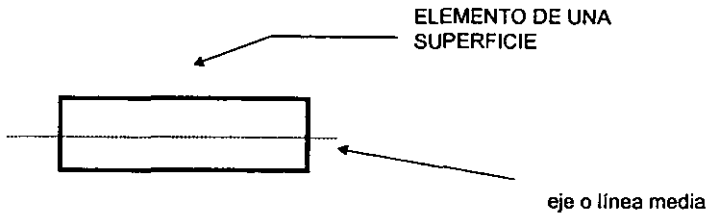


Figura 1.10. Muestra la forma esquemática de la rectitud

**Planitud.** Planitud es la condición de una superficie que tiene todos sus elementos en un plano. La tolerancia de planitud especifica una zona de tolerancia, definida por dos planos paralelos dentro de los cuales debe encontrarse la superficie. En pocas palabras, la planitud son dos planos separados por la tolerancia, uno de ellos será siempre "cero" y el otro representará el ancho de la tolerancia. Para la verificación de una planitud, es necesario colocar la superficie a evaluar en tres puntos de apoyo y estos deberán estar puestos en cero, como se muestra en la figura 1.11

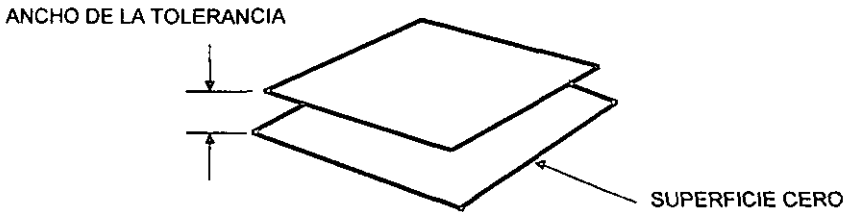


Figura 1.11. Muestra la forma esquemática de la planitud

**Redondez.** La tolerancia de redondez o circularidad especifica una zona de tolerancia limitada por dos círculos concéntricos, dentro de los cuales cada elemento de la superficie (círculo) debe encontrarse. En la actualidad existen máquinas para graficar la redondez, aunque aquí realmente interesa el valor numérico obtenido en una evaluación de redondez. La gráfica es solo una ayuda visual. La tolerancia de redondez debe ser menor que la tolerancia de tamaño, como se muestra en la figura 1.12.

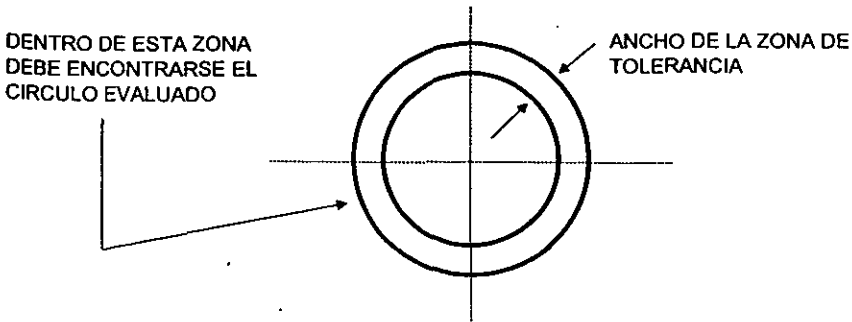


Figura 1.12. Muestra la forma esquemática de la redondez

**Cilindricidad.** Cilindricidad es una condición de una superficie de revolución, en la cual todos los puntos de la superficie son equidistantes de un eje común. Una tolerancia de cilindricidad especifica una zona de tolerancia limitada por dos cilindros concéntricos, dentro de los cuales debe encontrarse la superficie. En el caso de cilindricidad, a diferencia de la redondez; la tolerancia se aplica simultáneamente tanto a los elementos longitudinales como a los circulares de la superficie (toda la superficie) de tal modo, que es una tolerancia compuesta porque evalúa redondez y rectitud al mismo tiempo, como se muestra en la figura 1.13.

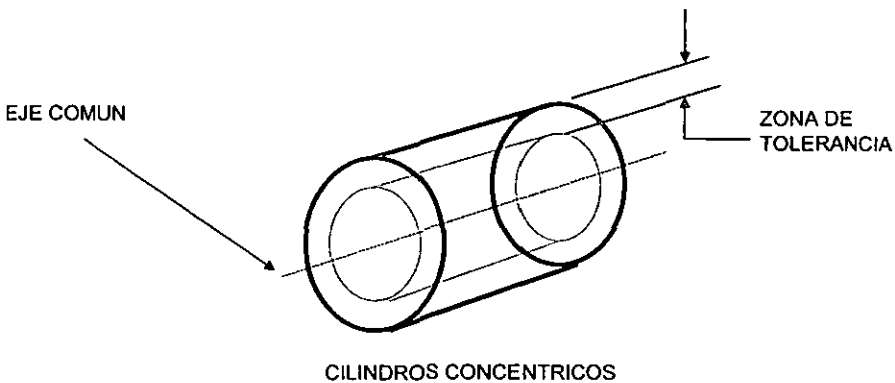


Figura 1.13. Muestra la forma esquemática de la cilindricidad

**Angularidad.** Angularidad es la condición de una superficie, plano central o un eje a un ángulo especificado diferente de  $90^\circ$  desde un plano o eje dato, es decir; plano o eje alineado. La característica de angularidad es una zona de tolerancia definida por dos planos, o ejes dato paralelos al ángulo básico especificado, dentro de los cuales debe de encontrarse la superficie, eje o línea de la característica considerada, como se muestra en la figura 1.14.

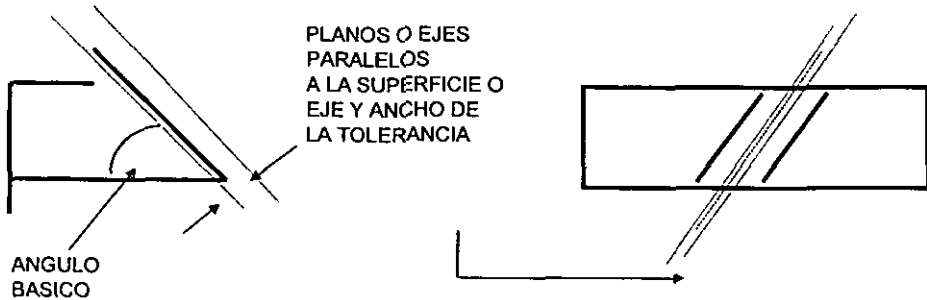


Figura 1.14. Muestra la forma esquemática de la angularidad

**Paralelismo.** Paralelismo es la condición de una superficie, plano central, o un eje equidistante en todos sus puntos desde un plano o eje dato a una determinada distancia. La tolerancia está definida por dos planos o ejes paralelos a un plano o eje dato, dentro de la cual debe encontrarse la característica considerada, como se muestra en la figura 1.15

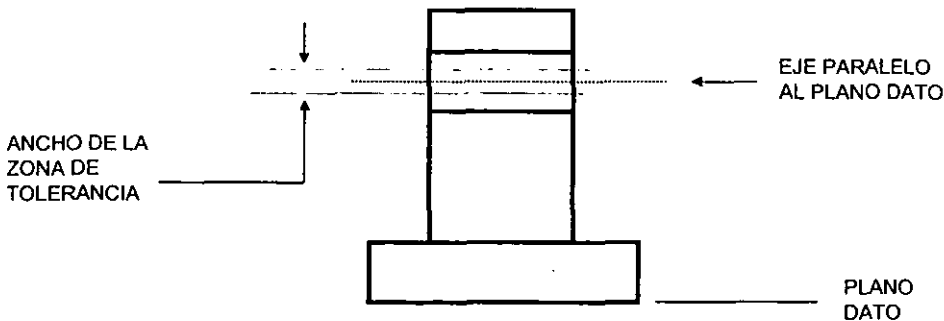


Figura 1.15. Muestra la forma esquemática del paralelismo

**Perpendicularidad.** Perpendicularidad es la condición de una superficie, plano central, o eje en ángulo recto ( $90^\circ$ ) a un plano o eje dato. La perpendicularidad especifica una zona de tolerancia definida por dos planos, líneas, o una zona cilíndrica perpendicular a un plano o eje dato, dentro de los cuales debe encontrarse la característica considerada, como se muestra en la figura 1.16

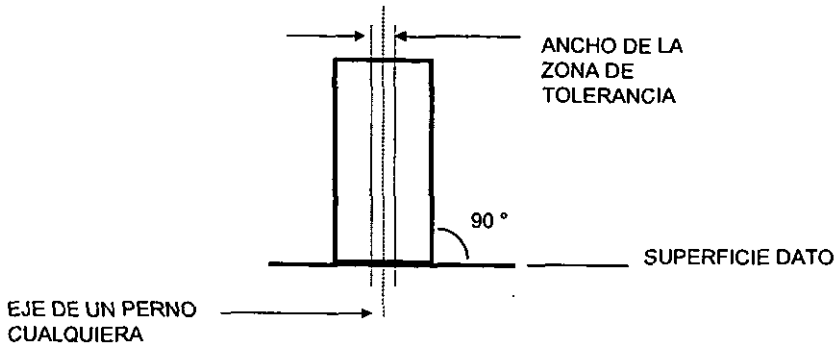


Figura 1.16. Muestra la forma esquemática de la perpendicularidad

**Perfil.** La tolerancia de perfil especifica un límite uniforme a lo largo del perfil ideal, dentro del cual los elementos de la superficie deben encontrarse. Es usada para controlar forma o combinaciones de tamaño, forma, orientación y localización. El perfil ideal puede ser definido mediante radios básicos, dimensiones básicas, ángulos básicos y dimensiones de tamaño básicos, como se muestra en la figura 1.17

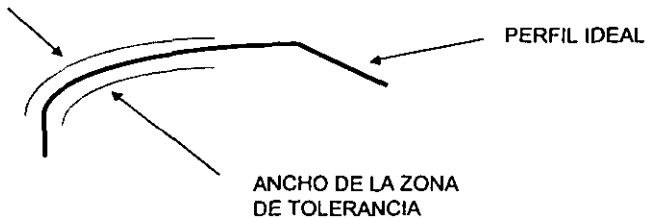


Figura 1.17. Muestra la forma esquemática del perfil

**Cabeceo.** El cabeceo es una tolerancia compuesta, usada para controlar la relación funcional de una o más características de una parte a un eje dato. Los tipos de características controladas mediante tolerancias de cabeceo, incluyen aquellas superficies construidas alrededor de un eje dato (piezas de revolución). Las características usadas para establecer los ejes dato deberán ser funcionales, tales como características de montaje que establecen un eje de rotación. Cada característica considerada, debe estar dentro de su tolerancia de cabeceo cuando la parte a evaluar es girada alrededor del eje

dato. Existen dos tipos de control de cabeceo, cabeceo circular y cabeceo total, como se muestra en la figura 1.18.



Figura 1.18. Muestra la forma esquemática del cabeceo

### 1.4.2. TOLERANCIAS DE LOCALIZACIÓN

La posición, concentricidad y simetría son tolerancias de localización y son usadas para controlar las siguientes relaciones:

- Distancias entre centros, entre características tales como agujeros, ranuras, salientes y nervaduras;
- Concentricidad o simetría de características - distancias entre centros de elementos correspondientes a la característica localizada - igualmente dispuestos alrededor de un eje o plano dato.

**Posición.** La tolerancia de posición se define como la zona diametral dentro de la cual puede variar la posición del centro de un eje o el centro de un círculo proyectado en un plano de referencia desde una posición ideal (teóricamente exacta) hasta una posición dentro de la zona toleranciada.

Un límite localizado como la posición ideal (teóricamente exacto), que no puede ser violado.

Las dimensiones básicas, establecen la posición ideal desde características dato específicas, y entre características interrelacionadas. Una tolerancia de posición es indicada mediante el símbolo de posición, un valor de tolerancia, un modificador de la condición de material aplicable, y referencias dato apropiadas, colocadas en un marco de control de característica, como se muestra en la figura 1.19.

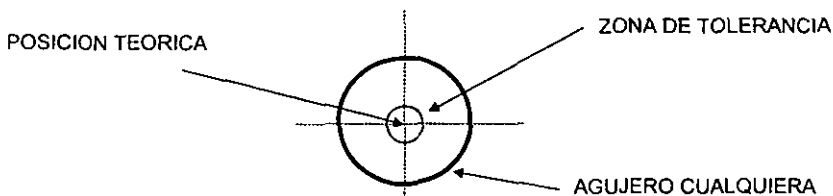


Figura 1.19. Muestra la forma esquemática de la posición.

**Concentricidad.** Concentricidad es la condición en la cual los puntos medios de todos los elementos diametralmente opuestos de una figura de revolución, son congruentes con el eje de una característica dato. Una tolerancia de concentricidad es una zona de tolerancia diametral o cilíndrica, cuyo eje (o punto central) coincide con el eje (o punto central) de la característica dato. La evaluación es muy parecida a la posición.

**Simetría.** Simetría es la condición en la cual los puntos medios de todos los elementos opuestos o correspondientes localizados, de dos o más superficies característica son congruentes con el eje o plano central de una característica dato. El control de simetría y concentricidad son el mismo concepto, pero son aplicadas a diferentes configuraciones de partes.

## REFERENCIAS

- <sup>I</sup> Cocquilhat, M., "Expériences sur la Résistance Utile Produites dans le Forage,"  
Annales des Travaux Publics en Belgique, 10, (1951), 199
- <sup>II</sup> Jossel, "Experiments on the Most Favorable Form of tool In Workshops from the Point of View of Economy of Power,"  
Annuaire de la Société des Anciens Élèves des Écoles Impériales d'arts et Métiers, 16 (1864).
- <sup>III</sup> Thime, I. A. "Soprotivlenie Metallov i Dereva Rezaniji ( Resistance of Metals and Woods to Cutting ),  
St. Petersburg, 1870.
- <sup>IV</sup> Tresca, H "Mémoires sur le Rabotage de Métaux,"  
Bulletin de la Société d'encouragement Pour l'industrie National (1873), 585
- <sup>V</sup> Mallock, A. " The action of Cutting Tools,"  
Proc. Royal Soc. (London) , 33 (1881), 127
- <sup>VI</sup> Reuleaux, F, " Über den Taylor Whiteshen Werkseugstahl," Verein zur Beförderung des Gewerbflusses en Preussen,  
Sitzungsberichte, 79 (1900), 179
- <sup>VII</sup> Taylor, F.W., " One the Art of Cutting Metals"  
Trans Amer. Soc. Mech Engrs., 28 (1907), 31
- <sup>VIII</sup> Rosenhain, W. and A. C. Sturney, " Report on Flow and Rupture of Metals During Cutting,"  
Proc Inst Mech. Engrs., 114 (1925), 141.
- <sup>IX</sup> Coker E. G. and K.C: Chakko, " Experiment on the action of Cutting Tools"  
Proc. Inst. Mech Engrs., 113 (1922) 567.
- <sup>X</sup> Coker E. G. " Report on the action of Cutting Tools"  
Proc. Inst. Mech Engrs., 114 (1922) 357.
- <sup>XI</sup> Ernst, H., and M. Martellotti, " The formation of the Build - up Edge", Mech. Eng. 57 (1938) 487.
- <sup>XII</sup> Ernst, H and Merchant, M. E. "Chip Formation, Friction and Finish"  
Cincinnati, Ohio: Cincinnati Milling Machine Co. 1940.
- <sup>XIII</sup> Kronenberg, M " Cutting Angle Relationships on Metal Cutting Tools"  
Mechanical Engineering, 65 (1943), 901.
- <sup>XIV</sup> Merchant, M E., " Basic Mechanics of the Metal Cutting Process,"  
J. of Appl. Mechanics, 15 (1944), A-168.
- Merchant, M E., " Mechanics of the Metal Cutting Process- I: Orthogonal Cutting and Type 2 Chip,"  
J. of Appl. Physical , 16 (1945), 267

## Capítulo II

# CONDICIONES DE CORTE PARA EL MAQUINADO DE ALUMINIO

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Las empresas automotrices que se dedican al maquinado de aluminio y sus aleaciones, emplean la más avanzada tecnología en el ámbito mundial, para garantizar la calidad de cada pieza que se maquina, así como la tecnología de punta en el desarrollo de nuevas y sofisticadas herramientas de corte, logrando de este modo fabricar las piezas que los automóviles requieren en corto tiempo, bajos precios y cumpliendo las estrictas normas de calidad mundial.

Con la creciente demanda y la fuerte competencia en el ámbito mundial de los fabricantes de auto - partes, las empresas del ramo metal mecánicos, se ven en la necesidad de invertir grandes cantidades de dinero para competir a escala mundial, contando con personal altamente capacitado y con la más alta tecnología para lograr los altos índices de calidad que la industria automotriz requiere.

### 2.2. MAQUINABILIDAD

La maquinabilidad no se ha definido perfectamente, debido a que es un concepto relativo, y que depende de la facilidad con la cual se desprende la viruta de la pieza, es decir, mientras más fácil se retira la viruta, sin causar problemas al proceso, se dice que el material que se está trabajando tiene más alta maquinabilidad, y viceversa. Este concepto fue primeramente empleado en el año de 1920 y se refería específicamente a la relación de velocidad de corte y vida de herramienta, no obstante, la maquinabilidad era una propiedad ligada a la dureza del material de trabajo, en combinación con la facilidad de la herramienta para retirar la viruta. Por lo tanto, una simple y exacta definición de esta propiedad no ha sido desarrollada y por lo tanto no existe una unidad para dimensionarla. Generalmente se ha aceptado que la maquinabilidad está principalmente relacionada con las características propias del material de trabajo. Un



material tiene buena maquinabilidad si la herramienta tiene un bajo índice de desgaste o si la duración de la herramienta es alta y el acabado superficial es bueno y por ende las fuerzas de corte son pequeñas. Además, son factores importantes el buen desalajo de la viruta y la excelente precisión dimensional.

Los parámetros para estimar la maquinabilidad están sujetos a numerosas variables tales como el material de las herramientas, la geometría de las herramientas, las condiciones de corte, etc. No es de sorprender que la maquinabilidad es un concepto difícil de expresar en términos cuantitativos. Algunas medidas de maquinabilidad son necesarias y útiles para el propósito de seleccionar un determinado material de corte y de trabajo.

La maquinabilidad está en función de numerosas y diferentes variables, se ha llegado a expresar comúnmente en términos de la velocidad de corte, relacionándola con la vida de la herramienta en minutos. Para comparar las condiciones de corte de un material, se toma un material como punto de comparación o estándar. La maquinabilidad de cualquier material puede ser relacionada a este estándar mediante la determinación de la velocidad de corte en 60 minutos ( $V_{60}$ ) o en 90 minutos ( $V_{90}$ ), tomando la relación ( $V_{60}$  material/ $V_{90}$  estándar) y expresarla en porcentaje. Esta relación se denomina maquinabilidad relativa. Es claro que, un material con una alta velocidad de corte, para 60 minutos de vida de herramienta, podría considerarse que tiene una alta maquinabilidad, lo cual es deseable para los procesos de maquinado.

Recientemente se ha escrito mucho sobre maquinabilidad relativa lo cual permite comparar diferentes materiales de corte y materiales de trabajo, y seleccionar el que mejor se acople a la necesidad buscada. La maquinabilidad relativa, es por tanto la facilidad del material para maquinar desde el punto de vista de desgaste de herramientas y vida útil de herramientas. Por ello, cuando se estima de esta manera la maquinabilidad es esencialmente equivalente a la duración de la herramienta manteniendo las características peculiares del material de trabajo. Es importante resaltar que si diferentes materiales son empleados para estimar la maquinabilidad o vida útil de las herramientas, de igual forma es importante aclarar que la vida de las herramientas depende de numerosos factores, tales como variaciones en la concentración del soluble, incrustaciones de otros materiales en la pieza de trabajo, deficiencias en la fabricación de la herramienta, etc., que está todavía lejos de control del personal del área de producción, por lo que, hasta el momento es preferible trabajar con estas variaciones.

Con el fin de ejemplificar este fenómeno, en las industrias metal - mecánicas con altos índices de producción, se presentan variaciones críticas en la concentración del soluble, ya que en una máquina que trabaja 24 horas al día y que tiene una capacidad de almacenaje 500 litros de soluble de corte, pierde diariamente hasta 100 litros de líquido por diversas causas, entre las principales se encuentra la evaporación del agua en el momento del corte, arrastre por la rebaba, "salpiqueo", arrastre al momento de limpiar las piezas ya maquinadas, etc., ocasionando fuertes gradientes de variación en la concentración del soluble

provocando variaciones en los procesos de maquinado, hasta el grado de tener desgastes prematuros en las herramientas, ya que muchas herramientas requieren de cierto grado de concentración de soluble para trabajar en óptimas condiciones.

### **2.2.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA MAQUINABILIDAD.**

Una de las características que más influye en la propiedad de maquinabilidad de los materiales, es su propia dureza, ya que esto ocasiona un mayor o menor consumo de potencia, así como, la variación en la temperatura durante el corte y por consiguiente su afectación en el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Sin embargo, existen otras circunstancias que afectan la maquinabilidad, por ejemplo, los metales puros tienden a adherirse a la superficie de trabajo de la herramienta de corte, provocan grandes fuerzas de fricción y desgaste prematuro de la herramienta por unidad de tiempo. Por otro lado, cuando se maquina hierro puro, las fuerzas de corte y el desgaste son exageradamente elevadas, casi tan grandes como cuando se maquinan materiales más duros que éste, como los aceros aleados muy tenaces.

La adición deliberada del azufre, plomo o telurio tanto en los metales no ferrosos como en los aceros aumenta la productividad y mejora el acabado superficial, pero no se puede explicar completamente el mecanismo de funcionamiento de estos aleantes. Parece que los aleantes mencionados reducen la fricción durante el contacto metálico entre la herramienta y el material de trabajo, disminuyendo el desgaste de la herramienta por unidad de tiempo. Estos constituyentes no afectan grandemente las propiedades mecánicas del metal base a temperatura ambiente, pero a temperaturas elevadas dichas propiedades pueden ser afectadas notablemente. El efecto del azufre, el plomo o el telurio sobre las propiedades de los metales a temperaturas elevadas limitan el uso de estos materiales denominados de alta maquinabilidad, pero a pesar de ello tienen una gran aplicación industrial y su demanda es elevada. La falta de una teoría sobre el efecto del material de la pieza en el desgaste de la herramienta dificulta la labor de los ingenieros y metalúrgicos involucrados en la producción. Sin embargo, para la automatización creciente de los procesos de maquinado, es necesario mantener estas características consistentes del desgaste de las herramientas, pero se presentan grandes diferencias en el desgaste, aun para herramientas de la misma especificación.

### **2.3. PARÁMETROS DE CORTE**

Las condiciones de corte en los procesos de fabricación de auto – partes son los parámetros de corte de los cuales dependen los acabados superficiales del producto, el control de las tolerancias geométricas y la vida útil de las herramientas, y en general, la calidad total de la pieza. Entre estos parámetros de corte se encuentra la velocidad de corte, la cual esta directamente relacionada con el proceso

de maquinado y con el material de la herramienta. La velocidad de corte se obtiene basándose en las tablas propuestas por los fabricantes de herramientas, además con este parámetro y con el diámetro de la herramienta es posible calcular el número de revoluciones por minuto a la cual debe girar la herramienta.

El avance de la herramienta es otro parámetro de suma importancia ya que de él dependerán una serie de circunstancias relacionadas con el proceso de maquinado, entre otras: el índice de productividad, las fuerzas de corte presentes durante el maquinado, el grado de desgaste de las herramientas, el acabado superficial, etc. Determinar el avance dentro de un proceso de maquinado resulta relativamente sencillo ya que este depende básicamente del número de filos de la herramienta.

Otro parámetro importante es la profundidad de corte mediante la cual se controlan las tolerancias dimensionales, especialmente la de planitud, redondez y acabado superficial, este parámetro se regula en función del excedente de material que trae la materia prima a maquinar y de las tolerancias antes mencionadas.

### **2.3.1. CONDICIONES DE MAQUINADO.**

Debido a la gran cantidad de factores físicos, químicos y mecánicos en campo, no es factible especificar fehacientemente algunas condiciones óptimas del maquinado de aluminio y sus aleaciones. En otras palabras, las grandes fluctuaciones a las que se ve sujeta una herramienta de corte durante el proceso ha dado lugar, a que en campo se realicen una gran variedad de pruebas de maquinado para evaluar las mejores condiciones de corte, evaluando desde el tipo de proceso de fundición (fundición por gravedad o fundición a presión), el tipo de sujeción (neumática, hidráulica o mecánica), si la pieza a maquinar posee la estructura física lo suficientemente fuerte o en su defecto es muy delgada o endeble, si los apoyos se encuentran cerca o lejos de las zonas con tolerancias geométricas más críticas de maquinado, etc. Una vez analizados todos los posibles factores de variación, se busca que la pieza maquinada esté dentro de especificación en las tolerancias geométricas que marca el plano. Esto da como resultado, que si un mismo tipo de pieza se maquina en dos máquinas distintas, existe la posibilidad de que aunque sean semejantes las máquinas, con herramientas gemelas y dispositivos de sujeción idénticos, se presenten diferentes condiciones de maquinado.

Además en estas pruebas se efectúan una serie de combinaciones entre la velocidad de corte, el avance por filo, profundidad de corte y concentración del soluble para encontrar el rango de operación de maquinado más adecuado, para obtener las mejores condiciones de corte, la máxima duración de la herramienta y mantener las tolerancias geométricas dentro de especificación en la pieza. Estas variables pueden ser manejadas de tal forma, que permiten generar el modo de falla deseado y determinar el rango de operación de los materiales de las herramientas de corte.

Aunque existen muchos factores que permiten obtener un rango aceptable de las condiciones de corte para obtener un buen acabado durante el fresado, las velocidades de corte, están regularmente en función del material de trabajo, del nivel de dureza de la pieza y la dureza del material de corte, es por ello que para determinar el rango de aplicación de una herramienta de corte, es necesario evaluar todas las condiciones de corte, hasta llegar a unas condiciones de balance entre duración de la herramienta, velocidad de corte, el avance por filo, profundidad de corte, concentración del soluble y nivel de productividad.

En la tabla 2.1, se especifican las condiciones de maquinado sobre las que se observa cómo varían los parámetros de corte, para obtener el acabado superficial que se requiere y así mejorar el tiempo de maquinado, dentro de cualquier proceso de corte con arranque de viruta, sin afectar las tolerancias geométricas deseadas.

Rango de aplicación de las condiciones de maquinado		
Acabado superficial	Velocidad rpm	Avance mm/rev
Desbaste	↓	↑
Acabado	↑	↓
Fresado frontal	↑	↓
Fresado de ranura	↑	↓
Material duro	↓	⇒
Material suave	↑	↑
vida de herramienta	↓	⇒
Profundidad	↓	↑

TABLA 2.1. Especifica las condiciones de maquinado para diferentes tipos de procesos<sup>1</sup>. ↓ disminuir, ⇒ mantener y ↑ aumentar.

### 2.3.1.1. VELOCIDAD DE CORTE.

Dentro de los parámetros de corte, el más difícil de valorar es la velocidad de corte, debido a que no solo está relacionada con los materiales de corte y la pieza de trabajo, sino también está en función del proceso de manufactura de la pieza. A pesar de que muchos libros y revistas técnicas marcan la velocidad de corte como un valor fácil de controlar, éste depende enteramente del proceso y sus condiciones físicas. Además, la velocidad de corte también varía en función del tipo de acabado que se pretende, sin embargo, no es conveniente ni tampoco redituable utilizar las mismas condiciones de corte para realizar un fresado, un desbaste o un acabado superficial con tolerancias muy cerradas. En la figura 2.1 se aprecian diferentes

<sup>1</sup>Metals Handbook, "Introduction to Machining Process", Pag 3, volumen 16

condiciones de maquinado con diversos materiales de corte, marcando en las áreas ahuradas la variación que existe para cada una de esas condiciones, así como los rangos de velocidad de corte que presentan en los diferentes materiales para efectuar el mismo tipo de corte.

Dentro de cualquier proceso de maquinado, la velocidad de corte, al igual que el avance, van unidos para determinar el tiempo ciclo del proceso, lo cual a su vez determina la calidad del producto. Existen una serie de condiciones que controlan indirectamente la velocidad de corte, entre ellas podemos mencionar: si se trabaja con una pieza de material producido por fundición por gravedad o fundición a presión, si el barreno es abierto o cerrado, el sistema de sujeción de la pieza (hidráulico, mecánico, neumático), etc. En la actualidad muchos procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones, que emplean cien por ciento herramientas de carburo y de diamante, ya que con estas herramientas se utilizan velocidades de corte muy altas, lo cual mejora considerablemente el tiempo de proceso de maquinado.

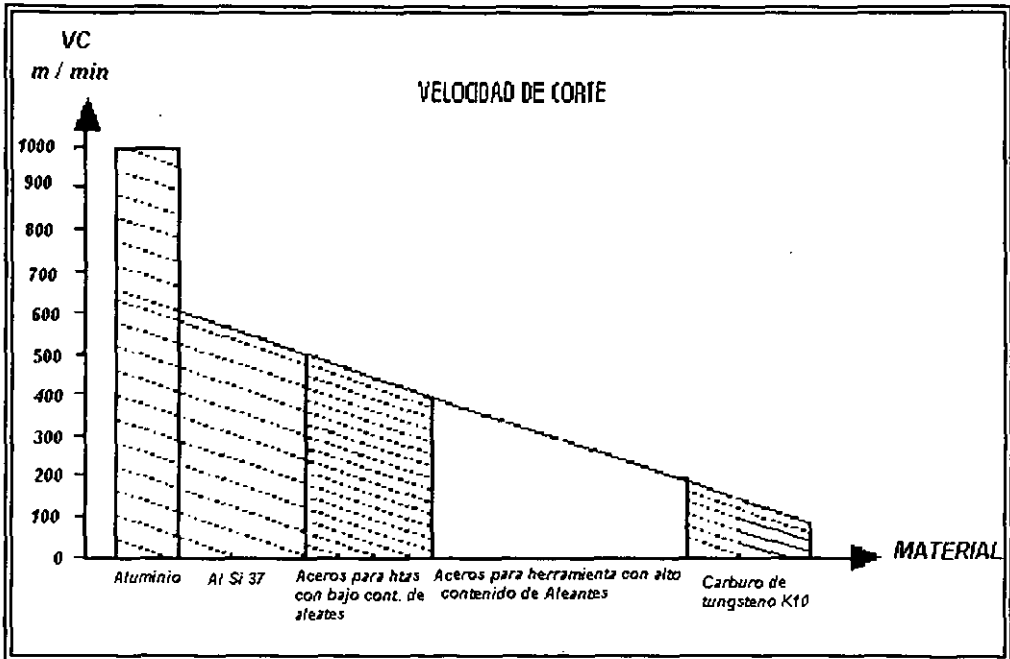


Figura 2.1 Tabla comparativa de diferentes materiales<sup>2</sup>

### 2.3.1.2. AVANCE

Dentro de los procesos de maquinado, se denomina avance a la velocidad lineal de la herramienta que se desplaza sobre la pieza de trabajo. Existen una serie de características importantes que dependen regularmente de este parámetro de corte, entre otros: el acabado superficial, la tolerancia de posición de un barreno, la redondez de un barreno, la rugosidad de un barreno rimado y algunos otros aspectos visuales en la pieza. A diferencia de la velocidad de corte, este parámetro de corte, depende del número de filos de la herramienta o el número de insertos, así como también del radio del inserto.

El avance se regula mediante una serie de circunstancias de proceso, tales como; el material de la herramienta (carburo para herramientas, diamante, etc.), el diámetro del zanco de la herramienta, el proceso de maquinado (barrenado, rimado, mandrilado, etc.), si el material para maquinar proviene del proceso de fundición a presión o del proceso de fundición por gravedad de molde permanente, o si se barrena con o sin barreno previo obtenido de fundición, del número de filos. En el caso de herramientas para escariar, depende del número de filos de corte, en el caso de formadores o machuelos viene especificados por el paso, en los cortadores depende del número de insertos y del acabado superficial que se desee.

En los catálogos de herramientas de corte, existe una relación de los avances específicos para las herramientas, pero estos avances en la práctica pueden llegar a variar considerablemente en función de las características que se pretenden obtener dentro de la pieza (tolerancias geométricas, rugosidades, etc.). Así también, el avance para aplicaciones en general, tiene un rango de aplicación 0.02 hasta 0.12 mm/rev por filo. En los centros de maquinado actuales existen sistemas que permiten introducir el soluble de corte por el centro de la herramienta lo que permite maquinar con avances de 0.01 mm/rev hasta 0.12 mm/rev por filo lubricando la herramienta en el instante mismo del corte en el filo de corte de la herramienta, permitiendo el desalajo de rebaba más rápido y eficiente y reduciendo el desgaste de la herramienta.

### 2.3.1.3. PROFUNDIDAD DE CORTE

Dentro de los parámetros de corte importantes para controlar el tiempo de maquinado en los sistemas de alta producción, se encuentra la profundidad de corte. La profundidad de corte depende plenamente del proceso de maquinado que se va a efectuar, es por ello que aquí se detalla como influye la profundidad de corte en función del proceso:

---

<sup>2</sup> Revista "Metal mecánica " Herramientas de corte. Edición junio 1996

- a) Si la pieza que se va a maquinar se obtiene del proceso de fundición a presión, para el caso del proceso de fresado de una superficie es posible lograrlo en una sola pasada, dependiendo del tamaño y forma de la pieza y cuando la tolerancia dimensional de planicidad no es tan crítica (0.2 mm en una área de corte 100 X 100 mm cuadrados). Pero si la pieza es obtenida mediante fundición por gravedad en molde permanente, las condiciones de maquinado cambian totalmente, para el caso del proceso de fresado de una superficie se realiza regularmente en dos, en la primera se retira la máxima cantidad de material y en la segunda se quitan de 0.5 a 1 mm de material para lograr la calidad de superficie especificada en dibujo.
- b) Si la pieza que se va a maquinar se obtiene mediante el proceso de fundición a presión y se requiere fresar una superficie que requiere una planicidad extremadamente pequeña (0.05 por cada 100 X 100 mm cuadrados o más pequeña) o si la pieza se deforma con mucha facilidad debido principalmente a una estructura endeble de la pieza, entonces el proceso se efectúa en dos o hasta tres pasadas, considerando la presión de sujeción y evitando que la pieza se flexione, justo después de ser sujeta por el dispositivo.
- c) Todos los procesos de rimado requieren sin excepción, de un precorte con una broca, debido substancialmente a que se trata de un proceso de acabado superficial del barreno (comúnmente se maneja de 0.2 a 0.3 mm de diámetro más pequeño en el precorte). Es importante resaltar que no es posible rimar un barreno que viene abierto de fundición (barreno previo obtenido de fundición con un diámetro menor al especificado en el plano de maquinado) ya que esto traería serios problemas en el funcionamiento de la pieza y un desgaste sumamente alto en ella.
- d) Todos los procesos de machueleado y formado requieren de un proceso previo de precorte con una broca, lo cual trae dos ventajas importantes: primero permite manejar brocas escalonadas para efectuar cajas, chaflán, etc., con lo cual se facilita el ensamble del tornillo y segundo, permite manejar el diámetro núcleo para cumplir con las estrictas normas de los dibujos. Existe una diferencia sustancial entre el barrenado de precorte para un machuelo y un formado, para el proceso de machueleado se calcula el diámetro de la broca en función del diámetro menos el paso de la cuerda, (por ejemplo: M8X1.25, el diámetro de la broca de precorte es de 6.750 mm) y en el caso del formado el diámetro de la broca de precorte se calcula con el diámetro de la cuerda menos el paso dividido entre dos, (ejemplo: M8X1.25, la broca de precorte es de 7.375 mm).

#### 2.3.1.4. ACEITES DE CORTE PARA EL MAQUINADO DE ALUMINIO

Dentro de la innumerable gama de materiales que se emplean en la rama de maquinado de materiales, es importancia seleccionar el tipo de fluido de corte que más se apegué a la combinación especial de material de la pieza de trabajo y material de la herramienta de corte; esta relación puede ser la diferencia básica entre una buena operación de maquinado y/o la falla dentro del proceso de maquinado.

Aunque en un principio solo se pensaba en la utilización de un fluido de corte para enfriar las herramientas durante el instante en que estas cortaban el material de trabajo, sus funciones en la actualidad han crecido a tal grado que, no solo enfrían la herramienta, sino también enfrían la pieza de trabajo, enfrían la viruta, reducen la fricción y lubrican durante la operación, sacan la viruta de la zona de corte, mejoran el acabado superficial y protegen la superficie maquinada.

La gama de fluidos de corte para el maquinado de aluminio y sus aleaciones es muy amplia, por lo que, para los procesos de corte se emplea desde una emulsión de aceites solubles, aceites minerales, hasta una solución química acuosa. Los aceites de corte que contienen componentes de azufre, componentes de cloro, o ambos, se emplean rara vez y no son usualmente empleados para el maquinado del aluminio, principalmente porque dañan los sellos de goma de las máquinas y pueden atacar químicamente a la superficie de la máquina. Además, muchos de ellos causan problemas tanto en el área de trabajo como al propio personal que los opera. En la tabla 2.2. se enlistan algunos fluidos de corte y sus aplicaciones.

Tipo de lubricante	Principales ingredientes	Rango de viscosidad	Aplicación: mantenimiento	Efectividad relativa	Precauciones necesarias.
<b>Aceites minerales</b>	Aceite mineral, manteca, grasas, ácido oleico	40 SUS <sup>3</sup> a 40 A para altas velocidades de maquinado a 300 SUS para bajas velocidad	Alto caudal para todos los ejes de corte, fluido reciclado para enfriar y limpiar	Buena lubricidad y flujo de viruta, buen enfriamiento, excelente acabado, minimiza la falla de los filos de corte con material adherido	Mantener un control del aire sobre el aceite donde existe neblina para evitar contaminación del medio ambiente
<b>Aceite soluble</b>	Aceite soluble, petróleo emulsificantes de sulfatos, agua, inhibidores de corrosión, germicidas, inhibidores de manchas	Flujo general	Alto caudal para todos los ejes de corte, fluido reciclado para enfriar y limpiar cuando sea necesario	Buen flujo de viruta, ajusta la lubricación para la concentración, excelente enfriador, buen acabado	Para altas velocidades de corte. El enfriamiento es mas importante que la lubricidad, donde la emulsión se aplica como una neblina, se reduce el contenido de aceite y los contaminantes.
<b>Solución química acuosa</b>	Agua; soluble sintético (regularmente claro), materiales grasos, inhibidores de dureza, germicidas	Flujo general	Alto caudal para todos los ejes de corte, fluido reciclado para enfriar y limpiar	Buen flujo de viruta, excelente velocidad de corte, excelente enfriamiento, lubricación ajustable, buen acabado	El contenido de aceite es bajo, se controla la neblina, costo considerable.

Tabla 2.2. Aceites solubles de corte para aluminio<sup>4</sup>.

- a) **Aceite soluble.** Se mezcla con agua en una relación de una parte de aceite por 20 o 30 partes de agua, éste es el mas ampliamente utilizado en el maquinado de aluminio. Las emulsiones de aceite soluble no son muy caras, altamente eficientes para enfriar la herramienta y retirar toda la rebaba, además son ideales para evitar el desgaste de las herramientas debido a los filos recrecidos.
- b) **Aceite mineral.** Utilizado como fluido de corte, contiene una gran cantidad de aditivos grasos, tales como el aceite de manteca, ácido oleico, ácidos esteáricos de butileno, etc. Sin embargo, los aceites

<sup>3</sup> Saybold Universal Second

<sup>4</sup> Información proporcionada por Castrol



minerales que no contienen aditivos y que tienen una viscosidad de 40 a 300 SUS (Saybold Universal Second), a 40°C (100 °F), son empleados con gran frecuencia. Conforme la velocidad de corte se incrementa, la viscosidad del aceite se decrementa para proporcionar un adecuado flujo y por lo tanto, un excelente enfriamiento de las herramientas de corte. Los aceites minerales naturales (40 SUS a 40 °C, o 100 °F) tienen mucho éxito en algunas aplicaciones de maquinado de aluminio. El Keroseno, a pesar de ser menos viscoso que el aceite mineral natural, es también empleado para el maquinado del aluminio y sus aleaciones.

- c) **Soluciones químicas.** Son muy efectivas como fluidos de corte para el maquinado del aluminio y sus aleaciones, especialmente cuando se requiere que el fluido de corte sea transparente para observar el trabajo de la herramienta durante el corte del material. Estas soluciones varían en composición, pero por lo general, contienen aminas, nitratos, fosfatos, boratos, jabón, agentes humidificantes, glicoles, y germicidas. Algunas de estas soluciones llegan a manchar al aluminio y sus aleaciones.
- d) **Lubricantes.** Son algunas veces empleados en sierras verticales, sierras circulares y bandas abrasivas, discos abrasivos o muelas abrasivas para pulir y desbastar, cuando el requerimiento no es muy grande y no es necesario un flujo del lubricante.

Como se describió en la parte superior, el aceite mas empleado en la industria del maquinado del aluminio y sus aleaciones es el aceite soluble, es por ello que, en la tabla 2.3 se especifican los rangos de control para un refrigerante soluble. Los parámetros de control de las principales variables físico - químicas y microbiológicas se determinan en el laboratorio.

El rango de concentración de trabajo se establece de acuerdo a la operación de maquinado mas crítica, severidad, requerimientos de acabado superficial, lubricidad, rendimiento de la vida de la herramienta, protección anticorrosiva, (metales ferrosos) y resistencia del soluble al ataque microbiológico.

PARÁMETROS	RANGO DE CONTROL
1. CONCENTRACION ■ Refractómetro ■ Por alcalinidad	variación 5 - 7 % 5 - 7 % 5 - 7 %
2. pH (Potenciometro Metter)	8.5 - 9.5
3. Aceites libres	Máximo 2.0 %
4. Bacterias, col/ml.	Máximo 10 E6
5. Hongos, col/ml.	Máximo 10 E4
6. Dureza total (ppm CaCO3)	Menor a 350
7. Sólidos, (8µ)	Máximo 0.1% ó 1000 ppm

Tabla 2.3. Muestra los contenidos de cada elemento dentro de los solubles<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Información proporcionada por Castrol

La dureza total y el porcentaje de sólidos se determinan con menor frecuencia que las cinco primeras pruebas debido a que éstas indican el grado de acumulación de contaminantes como sólidos, tierras finas, sales disueltas, como se indica en la tabla 2.4.

Los aceites solubles presentan diferentes concentraciones en función del proceso de maquinado para el aluminio y sus aleaciones. En otras palabras, cada proceso involucra diferentes forma de aplicación del soluble, al igual que diferente concentración. Enseguida se explica brevemente la influencia del fluido de corte en los diferentes procesos de maquinado:

- a) **Mandrilado.** En este proceso se emplea un abundante flujo de fluido de corte. Este proceso de maquinado requiere utilizar herramientas con barrenos internos, para que el soluble llegue exactamente al inserto de corte, garantizando con ello, una alta productividad, excelentes tolerancias dimensionales y acabados superficiales, así como aumentar la vida del inserto de corte.
- b) **Brochado.** Para este proceso se recomienda una cuantiosa cantidad de fluido para obtener excelentes resultados, sin embargo, rara vez es empleado en los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones.

CARACTERÍSTICAS	ACEITE SOLUBLE	ACEITE SEMISINTETICO	ACEITE ABS SINTETICO	ACEITE RECICLADO	ACEITE NATURAL
Número ácido					X*
Considerar Bacterias	X	X	X	X	
Contenido de ácido Bórico		X*	X*	X*	
Agentes positivos	X*				
Contenido de cloro					X*
Conductividad	X*	X*	X*	X*	
Contenido de impurezas	X*	X*	X*	X*	X*
Contenido de grasas					X*
Contenido de ácidos grasos	X*		X	X	
Aceites libres	X	X	X	X	
Hongos	X	X	X	X	
Dureza	X*	X*	X*	X*	
Contenido de lubricante			X**		
Contenido Noionico				X*	
PH	X	X	X	X	
Contenido de fósforo					X
Pruebas de herrumbre	X	X	X	X	
Contenido de sulfanatos	X	X			
Alcalinidad total		X	X	X	
Total de sulfuros					X
Trampa de aceite	X	X	X		
Viscosidad					X
Contenido de agua					X*

Tabla 2.4. Relación de las pruebas estándar que se efectúan a los diferentes aceites solubles.

X selección de la prueba

X\* Prueba opcional

X\*\* Prueba depende del producto

- a) **Barrenado.** El proceso de barrenado, es uno de los procesos mas frecuentes en la industria metal mecánica, esto lo vuelve esencial por dos razones; para aumentar la vida de la herramienta y para mejorar la calidad del barreno, para ello, se emplean cuantiosas cantidades de fluido de corte que llega directamente a la punta de la broca para hacer el barreno. Cuando se realizan barrenos muy profundos de mas de 3 veces el diámetro de la broca se utiliza un nuevo sistema que permite introducir el soluble por el centro de la herramienta, para ello se emplean centros de maquinado CNC, los cuales, están acondicionados con una bomba de alta presión (20 a 70 bar) que impulsa el soluble por dentro del husillo principal hasta llegar a la broca que posee pequeños barrenos en el cuerpo de 1 a 0.5 mm de diámetro por donde sale el soluble. Este sistema proporciona mayor vida a las herramientas y permite un aumento en los parámetros de corte, porque el fluido de corte llega directo al filo de la herramienta, el excelente desalojo de la rebaba en los barrenos profundos y el excelente enfriamiento de la herramienta y la pieza de trabajo.
- b) **Rimado.** En las altas velocidades de corte que se emplean en los procesos de rimado, se requiere de un fluido de corte que permita reducir la temperatura en la pieza de trabajo, minimizar las distorsiones y prevenir las variaciones en el barreno rimado. Para rimas de carburo se emplea eficientemente la emulsión de aceite y agua. El proceso de rimado regularmente indica cual debe ser la concentración que se requiere en el proceso de fabricación de una pieza. En estos casos, la concentración de soluble es alta (7 a 9% de concentración), porque estas herramientas proporcionan a los barrenos la calidad dimensional, tanto en acabado superficial, redondez, rugosidad, etc. Así mismo, los procesos que requieren rimados muy profundos, emplean rimas con soluble interior (sistema similar a las brocas). Las rimas con insertos de diamante emplean, por lo general, soluble interior para mantener la zona de corte relativamente fría y mantener el control dimensional del barreno rimado.
- c) **Fresado.** Para este proceso se requiere de una cuantiosa cantidad de fluido de corte a alta presión entre la herramienta y la pieza de trabajo. Es importante, principalmente con los cortadores de carburo, que el fluido de corte sea aplicado uniforme y consistentemente en toda la superficie del cortador, para prevenir un sobrecalentamiento y un súbito enfriamiento de los filos de corte, porque un choque térmico provoca una falla catastrófica en la vida de la herramienta de carburo. Los cortadores con insertos de diamante, por lo regular, suelen cortar sin fluido de corte, esto se debe primordialmente a que los insertos de diamante son extremadamente duros comparados con el aluminio, ya que el diamante disipa el calor fácilmente.
- d) **Formadores.** Estas herramientas requieren forzosamente grandes cantidades de fluido de corte, debido a que la operación que se realiza es una deformación mecánica del material de trabajo y por lo mismo, necesita un alto contenido de aceite soluble, (5 - 7 % de concentración). A pesar de que estas

herramientas son prácticamente de HSS con diferentes recubrimientos (cromo duro, TiN, cobalto, etc.), éstos solo se emplean para aumentar la vida de la herramienta, y no existe una relación directa entre el recubrimiento y el porcentaje de aceite soluble.

- e) **Machuelos.** Este tipo de herramienta no requiere de una concentración mas allá del 5 % de concentración de soluble, debido a que, el proceso de maquinado que realizan es solo corte, pero al igual que las brocas requieren de una alta cantidad de líquido para su enfriamiento y desalajo de la viruta.

#### 2.3.1.4.1. PROBLEMAS BÁSICOS CON LOS SOLUBLES DE CORTE

De todo los parámetros que influyen directamente en el maquinado, el fluido de corte juega un papel preponderante en la vida de la herramienta, en el acabado superficial, etc., sin embargo, existen una serie de problemas que conlleva el manejo de este líquido, los cuales pueden dividirse en dos grandes grupos:

- a) **Internos.** Son todos aquellos problemas que se relacionan directamente con el maquinado de la pieza
- **Concentración del soluble.** La influencia que tiene la concentración en los parámetros de corte dentro de los procesos de maquinado, proporciona una idea clara de la concentración requerida para el maquinado del aluminio, afectando directamente a la calidad de la pieza.
  - **Duración de la herramienta.** La influencia que tiene la concentración del soluble en la vida de las herramientas es preponderante.
  - **Parámetros de corte.** La influencia es directa en el caso de la velocidad de corte, el avance y profundidad de corte, es por ello, que si baja la concentración del soluble, esto afecta directamente a la duración de la herramienta y a los mecanismos de desgaste, por lo que se hace necesario mantener esta concentración en ciertos rangos.
- b) **Externos.** Existen también una serie de circunstancias que se presentan con el manejo del soluble, de las más importantes son:
- **Costos.** El consumo de soluble mensual en las grandes empresas es muy alto (estos dependen directamente del número de máquinas que se encuentren trabajando)
  - **Consumo.** Por lo general, cada máquina de control numérico utiliza en promedio de 5 a un 10 por ciento del total del líquido concentrado, dependiendo del tamaño del depósito de almacenaje del soluble. Existen una serie de causas que ocasionan que el consumo aumente, entre otras:
    - **Evaporación.** Diariamente se pierde de un 5 a un 10 por ciento de la mezcla total en el depósito de la máquina, por las temperaturas tan altas generadas durante el corte.

- **Arrastre.** Los sistemas que se tienen los depósitos de soluble para la extracción de rebabas, por lo general, arrastran una cantidad significativa de soluble (del 2 al 5 por ciento).
- **Espuma.** Cuando una máquina se llena con soluble nuevo, esta tiende a generar una gran cantidad de espuma, debido primordialmente a la agitación que provocan las bombas de soluble. Este suceso no se presenta en solubles envejecidos principalmente por encontrarse en un estado más estable.
- **Limpieza de piezas.** Aunque podría ser inapreciable, se pierde de un 1 a un 2 por ciento de soluble diariamente por el lavado y enjuagado de las piezas.
- **Cambio de soluble.** Por regla general se suele cambiar el soluble cuando este se encuentra tan contaminado de bacterias que puede ocasionar problemas de dermatitis en los operarios y cuando sus funciones principales ya no ayudan a la calidad de la pieza.

## Capítulo III

# MATERIALES DE LAS HERRAMIENTAS EMPLEADOS EN EL CORTE DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Todavía en el año de 1900, los procesos de maquinado de metales se realizaban con herramientas de corte fabricadas de acero con alto contenido de carbono o aceros aleados endurecidos al aire, este proceso se conocía como proceso de fabricación de aceros de Mushet<sup>1</sup>. Las velocidades de corte empleadas eran muy bajas, debido a la escasa dureza en caliente de los materiales de corte. Los primeros adelantos importantes fueron los realizados por Taylor<sup>2</sup>, cuando descubrió el uso del acero de alta velocidad (HSS), aplicándolo en las herramientas de corte. Su alta resistencia a altas temperaturas y su elevada resistencia al desgaste, hicieron posible el maquinado a más altas velocidades de corte. Las herramientas aleadas fundidas aparecieron en escena en el año de 1915. Estas tenían una alta resistencia al desgaste, resistencia a alta temperatura, pero mostraba una ligera tendencia a formar filos recrecidos en la punta de la herramienta. Otro importante adelanto se presentó en el año de 1926, cuando fue posible manufacturar herramientas de carburo de tungsteno sinterizado, empleando la técnica de pulvimetalurgia. Este desarrollo permitió el maquinado de piezas de metal con mayores velocidades de corte, que hasta ese momento no se habían logrado con el acero rápido de alta velocidad.

Posteriormente se fueron refinando los procesos de fabricación de materiales para las herramientas de corte, y se descubrieron otros tipos de materiales que se aplicaron en las herramientas de corte, como el carburo de tungsteno y el carburo de titanio, este último material presentó mucho más resistencia al desgaste que el carburo de tungsteno, pero en contraparte era mucho más frágil. En la actualidad se utiliza en forma de recubrimiento mediante una pequeña capa (de 5 a 8 micrómetros) para recubrir herramientas de carburo de tungsteno cementadas. Los materiales de las herramientas cementadas de óxidos fueron producidos en la década de los 1960's. En la figura 3.1 se muestra el desarrollo de los materiales de corte de las herramientas. Las velocidades de corte permisibles para este material eran de dos a tres veces más

altas que las empleadas para el carburo de tungsteno, para ello, fue necesario emplear sistemas sumamente rígidos (mas o menos libre de vibraciones). El diamante y nitruro cúbico de boro son los dos materiales de extrema dureza conocidos hoy en día. Estos han encontrado numerosas aplicaciones en la industria metal - mecánica como abrasivos ultraduros y algunas de las aplicaciones substanciales son como herramientas de corte en el área de maquinado.

En la actualidad se tienen algunos criterios para determinar la aplicabilidad en el corte, ellos son, la dureza, la resistencia a la fractura y la resistencia a temperaturas elevadas. Es posible formular innumerables combinaciones de recubrimientos, sustratos y materiales base que suministren relaciones específicas de tenacidad - dureza para ajustarse a varias aplicaciones.

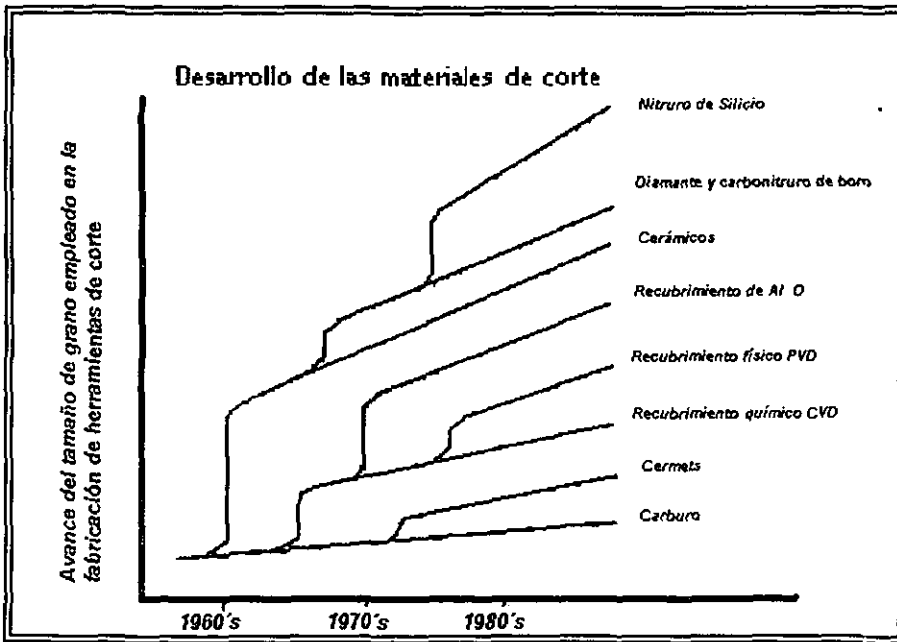


Figura 3.1. La gráfica muestra una escala de velocidad de corte y avance de los diferentes materiales de las herramientas desde las acero de alta velocidad hasta las cerámicas, diamantes o CBN<sup>1</sup>

Los materiales se pueden clasificar desde los que poseen mejores características de tenacidad

<sup>1</sup> Sumitomo Electric, worldwide Performance. Sumitomo electrical carbide, INC General Catalog for Cutting Tools Products.

SFM pies cuadrados por minuto

hasta los que tienen mayor resistencia al choque térmico, comenzando desde el HSS y continuando con el diamante y los recubrimientos de CBN, se puede construir en una escala progresiva desde las mejores características de tenacidad hasta las de mejor resistencia al choque térmico. Los aceros de alta velocidad pueden resistir esfuerzos repetitivos o resistencia a la fatiga pero no resisten temperaturas muy elevadas. Las herramientas cerámicas y las recubiertas pueden resistir altas temperaturas pero se fracturan fácilmente.

De acuerdo con Spanovich<sup>10</sup>, las herramientas de carburo de tungsteno tienen generalmente un rango de trabajo de 100 a 1200 sfm<sup>1</sup> (las herramientas de HSS llegan aproximadamente hasta 100 sfm). Las herramientas cerámicas, incluyendo el nitruro de silicio llegan a trabajar por encima de los 4000 sfm. Las herramientas de diamante policristalino y con recubrimiento de CBN trabajan sin ningún problema a velocidades superiores a 4000 sfm.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LOS MATERIALES DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

Las características más importantes en las propiedades de las herramientas de corte son la alta resistencia al desgaste, la dureza a altas temperaturas y la tenacidad. Esto es debido a que, durante el maquinado la punta de la herramienta se encuentra sujeta a altas temperaturas, intensas presiones normales y fuerzas de fricción, acción de deterioro por intenso trabajo realizado por la viruta en la superficie de ataque de la herramienta, acción de deterioro de la superficie maquinada en el flanco de la herramienta, impacto y vibración, etcétera.

- a) **Resistencia al desgaste.** El desgaste de las herramientas de corte, se debe primordialmente a la abrasión, adhesión y difusión. La acción de abrasión la ocasiona el flujo de la viruta sobre la superficie de ataque de la herramienta provocado por la intensa presión y la acción de rozamiento de la superficie maquinada con los flancos de la herramienta. La acción de abrasión es la más frecuente y destructiva. Es consecuencia de sí el material de la pieza es más duro que el de la herramienta o si la temperatura de corte es muy alta.

La adhesión se refiere a la pérdida gradual del material de la herramienta cuando sus partículas se adhieren a la viruta o a la superficie maquinada y tiende a desgarrarse más allá del filo de corte de la herramienta.

La difusión es la transferencia de átomos del material de trabajo dentro del material de la



herramienta, resultando un debilitamiento posterior. Las capas debilitadas del material de la herramienta son posteriormente removidas por la abrasión.

La resistencia al desgaste se refiere a la habilidad del material de la herramienta para mantener su filo y su forma el tiempo suficiente mientras se realiza el maquinado del material.

- b) **Dureza en caliente.** Esta es una manera de medir la habilidad del material de la herramienta para mantener su dureza a elevadas temperaturas de operación y altas velocidades de corte, considerando los altos niveles de productividad. Este es uno de los objetivos primordiales de los investigadores para desarrollar nuevos materiales de las herramientas, los cuales deben tener alta dureza en caliente para así trabajar con altas velocidades de corte, y con ello obtener los máximos niveles de producción.
- c) **Tenacidad.** Esta es la habilidad de los materiales para absorber toda la energía de deformación por unidad de volumen antes de la ruptura. La tenacidad es la capacidad de los materiales de mantenerse estables a cargas externas, impactos y cortes intermitentes. Esto, sin embargo, es muy difícil de mantener ya que la experiencia indica que los materiales con alta resistencia al desgaste tienen también una alta dureza en caliente y una baja resistencia a esfuerzos cortantes y, en consecuencia una baja tenacidad.
- d) **Otras propiedades deseables.** El material ideal para las herramientas de corte debe tener una alta conductividad térmica para remover rápidamente el calor que se presenta en la interfase de la herramienta y la viruta, contando con un bajo coeficiente de expansión térmica, para evitar las distorsiones.

### 3.3. MATERIALES DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

En todos los procesos de corte de metales, es necesario conocer las propiedades básicas de los materiales principales de las herramientas de corte, normalmente los de alto contenido de carbono, los de acero de alta velocidad, de aleaciones fundidas, de carburo sinterizado, cerámicas, carburo de boro y diamante. A pesar de que este trabajo se enfoca básicamente al estudio de las herramientas de corte más comunes para el maquinado del aluminio, en la actualidad es posible utilizar materiales cerámicos, de carburo de boro, etc., para operaciones muy específicas en los diferentes procesos de alta producción.

#### 3.3.1. ACEROS DE ALTA VELOCIDAD (HSS)

Las herramientas de aceros de alta velocidad (HSS) y sus requerimientos están definidos por la American Society for Testing and Materials en la especificación A600-79 como sigue: las herramientas de acero de alta velocidad son llamadas principalmente así por su habilidad para maquinar materiales a altas

---

<sup>1</sup> SFM es la velocidad en pies por minuto

velocidades de corte. Estos son una aleación compleja a partir de hierro aleado con carbono, cromo, vanadio, molibdeno o tungsteno o una combinación de ellos, y en algunos casos una cantidad sustancial de cobalto. El carbono y el contenido de aleantes están balanceados para obtener la dureza deseable, alta resistencia al desgaste, una alta resistencia al ablandamiento debido a los efectos de la temperatura y una buena tenacidad para el uso de las operaciones de corte industriales. En la práctica comercial se han desarrollado dos grupos de materiales de corte de esta clase:

- a) El primer grupo es la reorganización de estándares de las herramientas de HSS, en el cual se especifican todas las aplicaciones y las condiciones de corte tanto severos como suaves.
- b) El segundo es un pequeño grupo de aceros intermedios, con los cuales se satisfacen las condiciones de corte moderadas y suaves.

Existen más de 40 clasificaciones de las herramientas de HSS, de acuerdo a la **American Iron and Steel Institute (AISI)**. Existen básicamente dos clasificaciones de los materiales de HSS, los llamados de tipo T (tungsteno) en donde el tungsteno es el elemento de mayor proporción en la aleación (12 - 18%) y el denominado M (molibdeno) siendo el molibdeno el elemento de mayor proporción en la aleación (8 - 12%). Ambos tipos contienen por lo menos un 4% de cromo para obtener una buena dureza. Se adiciona vanadio de un 2 - 4% para incrementar su resistencia contra la abrasión y se adiciona también cobalto de 5 - 12% para incrementar su dureza en caliente. El material de HSS se fabrica mediante un método de metalurgia de polvos y un proceso de refinado mediante electro - escoria. Con estos dos métodos resulta una composición más uniforme, estructura granular más fina y libre de inclusiones y segregaciones. Las propiedades de las herramientas de HSS dependen substancialmente del tratamiento térmico, por lo que éste debe cumplir con las recomendaciones del proceso de manufactura. La superficie de las herramientas de HSS puede ser endurecida mediante un tratamiento de trabajo en frío, y a los filos de corte de las herramientas se les da finalmente un pulido para incrementar considerablemente la vida de la herramienta. En la actualidad se emplean HSS con un tratamiento para recubrirlo con carburo de tungsteno, carburo de titanio, nitruro de titanio, alúmina, etc. El HSS es ampliamente usado para la fabricación de brocas y rimas, cortadores rectos, herramientas para tornos, brochadoras, formadores con recubrimientos, etc. Especialmente para el maquinado de materiales suaves como los no ferrosos y aceros en donde su dureza es inferior a 300 BHN y que la temperatura no exceda los 600 °C.

### **3.3.2. CARBURO DE TUNGSTENO**

El carburo cementado pertenece a los materiales más duros que presentan alta resistencia al desgaste en los cuales las partículas duras del carburo se encuentran unidas o cementadas mediante un metal suave. Este material se desarrolló en Alemania alrededor de los años 1920, para resolver los

problemas que se presentaban en los materiales de los moldes, teniendo suficiente resistencia al desgaste para la elaboración de filamentos incandescentes de carburo de tungsteno para reemplazar la matriz de diamante empleadas en ese tiempo. El primer carburo cementado que se produjo fue el carburo de tungsteno mezclado con cobalto.

El carburo de tungsteno fue el primer material sinterizado por el químico francés Henri Moissan<sup>V</sup> en 1890. Existen dos tipos de materiales de carburo de tungsteno: el de tipo WC, el cual se descompone directamente a 2800 °C y el W<sub>2</sub>C, el cual funde a los 2750 °C. Recientemente se intentó producir moldes de aleaciones eutécticas de WC y W<sub>2</sub>C sin éxito, debido a que el material tenía muchos defectos e imperfecciones y se fracturaba fácilmente. El uso de la técnica de metalurgia de polvos aplicada por Schroeter<sup>V</sup> consolidó el empleo del producto. Schroeter mezcló polvo fino de WC con pequeñas cantidades de hierro, níquel, o polvos de cobalto aplicando altas presiones y sinterizado a 1300 °C. Pronto descubrió que el cobalto era el mejor aleante. En las posteriores investigaciones, los materiales WC-Co se han modificado para obtener una gran variedad de materiales de carburo cementado, los cuales son empleados en una gran variedad de aplicaciones, incluyendo herramientas de corte, construcción, brocas para piedra, partes sujetas a grandes desgastes, etc. Aproximadamente el 50 % del carburo es empleado en la elaboración de herramientas de corte.

### 3.3.2.1. FABRICACIÓN DEL CARBURO

El proceso de fabricación del carburo se realiza mediante un proceso de metalurgia de polvos que consiste en una secuencia de pasos en los cuales cada uno de ellos debe de ser cuidadosamente controlado para obtener el producto final con las propiedades deseadas, microestructura y características intrínsecas. Los pasos son los siguientes:

- Procesamiento del mineral metalífero y la preparación del carburo de tungsteno en polvo.
- Preparación de otros polvos de carburo.
- Producción del grado de pulverización
- Compactación de los polvos.
- Sinterización
- Formado post - sinterizado.

El producto sinterizado puede ser directamente empleado o puede ser molido, pulido, o emplearlo como recubrimiento para algunas aplicaciones.

a) **Preparación de los polvos de carburo de tungsteno.** Existen dos métodos mediante los cuales se

puede producir polvo de carburo de tungsteno utilizando una barra de mineral metálico. El método tradicional consiste en procesar el tungsteno químicamente produciendo amonio y óxidos de amonio. Estos componentes son reducidos con hidrógeno a polvo metálico de tungsteno. Los polvos finos de tungsteno son recubiertos con carbono y tratados térmicamente en una atmósfera de hidrógeno entre 1400 y 1500 °C, para producir partículas de carburo de tungsteno con una granulometría que varía de 0.5 a 30 µm. Cada partícula está compuesta por numerosos cristales de carburo de tungsteno y suelen agregarse en pequeñas cantidades de vanadio, cromo, o tantalio a los polvos de carburo de tungsteno antes de la carburización para producir granos más finos de carburo de tungsteno (<1µm). En los desarrollos más recientes de los procesos patentados, el carburo de tungsteno también se produce en forma de monocristal a través de una reducción directa de los minerales de tungsteno. El mineral se mezcla con óxido de hierro, aluminio, carbono y carburo de calcio, a una alta temperatura en una reacción exotérmica ( $2Al + 3FeO \leftrightarrow Al_2O_3 + 3Fe$ ) aproximadamente a 2,500 °C. Se produce una masa fundida que cuando se enfría consiste de carburo de tungsteno disperso en hierro, y una escoria que contiene impurezas. Los cristales de carburo de tungsteno son separados químicamente de la matriz de hierro.

**b) Preparación de otros polvos de carburo de tungsteno.** Los carburos de titanio, tantalio y niobio son utilizados como herramientas de corte de acero por su alto grado de resistencia al desgaste por cráter o químico y se obtiene de los óxidos de los metales de titanio, tantalio y niobio. Estos óxidos son mezclados con los polvos de carbono y tungsteno, la mezcla es tratada térmicamente en una atmósfera de hidrógeno o en vacío y se reducen los óxidos y forman una solución sólida de carburos tales como WC-TiC, WC-TiC-TaC, o WC-TiC - (Ta,Nb)C. El método de segregación puede ser empleado para producir una solución sólida de WC-TiC. En este método, los carburos individuales son disueltos en el níquel en estado líquido, y los carburos de la solución sólida se precipitan durante el enfriamiento.

**c) Producción del grado de pulverización.** El grado de pulverización del carburo cementado puede consistir del WC mezclado con unas finas adiciones metálicas de cobalto, níquel o hierro, o agregados de otros carburos cúbicos tales como TiC, TaC y NbC, dependiendo de los requerimientos y aplicaciones de las herramientas. Una molienda intensiva es necesaria para disolver los cristales de carburo y para mezclar los varios componentes de manera tal que cada partícula de carburo quede recubierta por el material de aporte. Esto se realiza en un molino de bolas.

La molienda se realiza en un líquido orgánico tal como, la acetona o el heptano, para minimizar el calentamiento de los polvos y evitar la oxidación. El líquido es destilado después de la operación de la molienda. Se adiciona en el estado final un lubricante sólido como la cera de parafina a los polvos y posteriormente se mezcla. El lubricante brinda una protección como recubrimiento a las partículas de carburo y prevé o reduce grandemente la oxidación de los polvos. Los lubricantes también imprimen esfuerzos para la presión o la mezcla de consolidación de los polvos.

Después de la molienda de los polvos, el líquido orgánico es retirado por secado. El proceso de secado por aspersión es comúnmente empleado en la industria de carburo cementado. Para ello un gas inerte caliente tal como el nitrógeno se impregna en una aspersión de partículas de carburo.

- d) **Consolidación de los polvos.** Una gran variedad de técnicas son empleadas para la compactación de los polvos de carburo cementado para definir su forma final. Las herramientas de carburo para su conformado son comprimidas en prensas (la presión se aplica en una sola dirección) en un proceso semiautomático o automático. Los insertos de las herramientas de corte son también comprimidos como pastillas, pero por lo regular requieren redefinir su forma y después se sinterizan. Se aplica una presión isostática en frío, en donde los polvos están sujetos a presiones iguales en todas las direcciones, seguido por el formado en verde. Esta también es una práctica común para herramientas de forma. Las barras y los alambres se fabrican mediante el proceso de extrusión.

A diferencia de muchos otros metales en polvo, los polvos de carburo cementado no se deforman durante el proceso de compactación. Por lo general, ellos no pueden llegar a comprimirse más allá de un 65% del límite superior teórico de la densidad. A reserva de su baja densidad en verde, los fabricantes de carburo han desarrollado la tecnología para obtener buenas tolerancias en los productos sinterizados.

- e) **Operación de sinterización y post-sinterización de los polvos.** El primer paso en la sinterización de los polvos es retirar los lubricantes de los polvos compactados. La matriz es normalmente recubierta con pintura de grafito. Los componentes se calientan primeramente a 500 °C en una atmósfera de hidrógeno o en un horno de grafito al vacío.

Después de remover el lubricante, la pieza es calentada en vacío (0.1Pa) a un rango de temperatura final de 1350 a 1600 °C, dependiendo de la cantidad de cobalto mezclado y la microestructura deseada. El proceso de sinterizado se realiza en un ciclo de vacío empleando un equipo para condensar los lubricantes y retirar esto de la cámara caliente.

Durante la operación final de sinterizado, el cobalto fundido y las partículas de carburo quedan unidas. La merma del material compactado se encuentra en el rango de 17 a 25 % en una escala lineal produciéndose libre de porosidad, siendo un producto completamente denso.

En los años 1970 la industria de carburo cementado tomó ventaja con la tecnología de presión isostática en caliente, en donde la sinterización en vacío del material se calentaba con un gas y se aplicaba una presión de 100 a 150 MPa. La temperatura adicional al proceso es de 25 a 50 °C bajo la temperatura de sinterizado. Las altas temperaturas y presiones en los hornos HIP retiran cualquier porosidad interna, huecos o flujos y tiende a producir un material lo más perfecto posible.

Los últimos avances en la tecnología del sinterizado es el proceso de SINTER - HIP, el cual fue desarrollado cerca de los años de 1980. En este proceso, la baja presión isostática (aproximadamente 7 MPa) se combina con el sinterizado en vacío, y la presión se aplica a la temperatura de sinterizado

cuando la mezcla está todavía en estado líquido. Con este proceso, los productos están libres de poros y su costo de fabricación es equivalente al costo del proceso de sinterizado en vacío.

- f) **Formado post - sinterizado.** Una gran cantidad de productos de carburo cementado son formados después del sinterizado porque necesitan un acabado superficial, tolerancias más cerradas y requerimientos geométricos. Estas operaciones de formación posterior del material consumen una gran cantidad de tiempo y dinero. El material sinterizado es formado con material recubierto con diamante o ruedas de carburo de silicio, herramientas giratorias con punta de diamante o lapeadoras que contiene incrustaciones de diamante.

### 3.3.2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CARBUROS CEMENTADOS

En la actualidad no existe un sistema universal para clasificar a los carburos cementados. Pero existe un sistema que se ha venido empleando por productores y usuarios. Cada sistema tiene esfuerzos inherentes y sus propias debilidades en la descripción del material específico y en este sentido existe una cooperación muy cerrada entre fabricantes y usuarios, y esta es la mejor manera de seleccionar el propio grado de aplicación.

- a) **Sistema de grado C.** Los fabricantes de carburo en los E.U.A., emplean un sistema de clasificación basándose en la selección del apropiado grado de carburo cementado. Este sistema de grado C no requiere el uso de un nombre comercial para identificar específicamente el grado de carburo. Aunque esta clasificación simplifica la aplicación de la herramienta, ésta no refleja que tan significativa es la influencia de las propiedades del material en la apropiada selección del grado de carburo. Además, la definición del material de trabajo inmerso en este esquema involucra una clasificación imprecisa.

Tabla 3.1.

- b) **Clasificación ISO.** En el año de 1964, la Organización Internacional de Estándares (ISO) estableció la norma ISO R513 "Aplicaciones del carburo para el maquinado con extracción de viruta", como se resume en la tabla 3.2.

En el sistema ISO todos los grados de maquinado están clasificados en tres grupos con código de colores:

- Grado de carburo de tungsteno altamente aleado (letra P, color azul) para el maquinado de acero.
- Grado de carburo de tungsteno aleado (letra M, color amarillo, generalmente con menor TiC que corresponde a la serie P) empleado en aleaciones, tales como el acero, superaleaciones base níquel, y hierro fundido dúctil.
- Grado de carburo de tungsteno básico (letra K, color rojo) para el maquinado de fundición gris, metales no ferrosos, materiales no metálicos.

GRADO - C	APLICACIÓN
<b>Maquinado de fundición de acero, materiales no ferrosos y no - metálicos</b>	
C-1	Maquinados rugosos
C-2	Propósitos generales de maquinado
C-3	Acabados
C-4	Acabado de alta precisión
<b>Maquinado de aceros al carbono y sus aleaciones</b>	
C-5	Maquinados rugosos
C-6	Propósitos generales de maquinado
C7	Acabados
C8	Acabado de alta precisión

Tabla 3.1. Sistema de grado C para la clasificación del carburo cementado\*

Cada grado se encuentra dentro de un grupo donde está asignado un número que representa su posición desde la máxima dureza hasta la máxima tenacidad. El Grado P está relacionado desde 01 hasta 50, el grado M desde 10 hasta 40 y el grado K desde 01 hasta 40. La aplicación común se describe para el grado mas o menos a intervalos regulares. Aunque el grado de recubrimiento no ha sido clasificado por ISO, este podría ser clasificado de la misma manera que los carburos no recubiertos.

### 3.3.3. DIAMANTE

El diamante es uno de los materiales más duros conocidos hasta nuestros días. En ellos encontramos números aplicaciones industriales, básicamente por su alta dureza y resistencia abrasiva y como herramientas de corte. Entre sus principales aplicaciones se encuentre el maquinado de materiales no ferrosos tales como:

- Aleaciones de aluminio
- Aleaciones de cobre
- Plásticos abrasivos
- Materiales compuestos reforzados con fibra de vidrio ó carbono
- Cerámicos
- Carburo de tungsteno
- Madera y plásticos abrasivos
- Piedras en estado natural

- Concreto

Designación	Material de trabajo	Condiciones de trabajo y aplicaciones
P 01	Acero y fundición de acero	Altas velocidades de corte, exactitud dimensión y acabado fino, operaciones libres de vibración, acabado en el torneado y mandriladoras.
P10	Acero y fundición de acero	Torneado, copladora, roscado, y fresado, Altas velocidades de corte, virutas de pequeña o mediana sección.
P20	Acero, fundición de acero, fundición de hierro maleable con longitud de viruta larga.	Torneado, copladora y fresado, velocidades de corte mediana, virutas de pequeña o mediana sección. Planicidad con pequeña sección de viruta
P30	Acero, fundición de acero, fundición de hierro maleable con longitud de viruta larga.	Torneado, planeado y fresado, medianas o bajas velocidades de corte, virutas de pequeña o mediana sección. Maquinado en condiciones desfavorables.
P40	Acero, fundición de acero, con inclusiones de arena y cavidades	Torneado, planeado, ranurado, con bajas velocidades de corte, virutas de larga sección con posibilidades de ángulos de corte largos para maquinados desfavorables y trabajo en máquinas automáticas.
P50	Acero, fundición de acero de mediano o bajo esfuerzos de tensión con inclusiones de arena y cavidades	Para operaciones que demandan carburo de alta tenacidad: torneado, planeado, ranuras, bajas velocidades de corte, sección grande de la viruta, con la posibilidad de grandes ángulos de corte para maquinados en condiciones desfavorables y trabajo con máquinas automáticas.
M10	Acero, fundición de acero, acero al manganeso, fundición gris, fundición gris aleada.	Torneado, con medianas y altas velocidades de corte, virutas con sección mediana o pequeña.
M20	Acero, fundición de acero, acero al manganeso o austenítico, fundición gris.	Torneado, fresado con medianas velocidades de corte, virutas con sección
M30	Acero, fundición de acero, acero austenítico, fundición gris, aleaciones resistentes a altas temperaturas.	Torneado, fresado, planeado con medianas velocidades de corte, virutas de mediana y larga sección
M40	Aceros suaves, aceros de bajos esfuerzos de tensión, metales no ferrosos, aleaciones ligeras.	Torneado, tronzado, particularmente en máquinas automáticas.
K01	Fundición gris muy dura, dureza mayor a 85 HB, Aleaciones de aluminio con alto contenido de silicio, aceros endurecidos, plásticos altamente abrasivos, cerámicos.	Torneado, acabado en el torneado, mandrilado, fresado.
K10	Fundición gris con dureza mayor a 220 HB, fundición de acero maleable con viruta corta, aceros duros, aleaciones de aluminio y silicio, aleaciones de cobre, plástico, piedra, porcelana.	Torneado, fresado, barrenado, mandrilado, brochado.
K20	Fundición gris con dureza mayor a 220 HB, metales no ferrosos, cobre, bronce aluminio.	Torneado, fresado, planicidad, mandrilado, brochado, carburos que demandan alta tenacidad.
K30	Fundición gris de baja dureza, aceros de bajo esfuerzo de tensión, madera comprimida.	Torneado, fresado, planeado, mandrilado, maquinado en condiciones desfavorables, y con posibilidad de grandes ángulos de corte.
K40	Madera suave o madera dura, metales no ferrosos	Torneado, fresado, planeado, mandrilado, maquinado en condiciones desfavorables, y con posibilidad de grandes ángulos de corte.

Tabla 3.2. Clasificación de los carburos de acuerdo al maquinado que se requiere (ISO R513)<sup>III</sup>

<sup>III</sup> Metals Handbook, Machining, Vol 16, 1989, ASM International



### 3.3.3.1. PROCESO DE FABRICACIÓN DE DIAMANTE INDUSTRIAL

**Sinterizado de polvo de diamante.** El volumen de diamante usado en la industria es fabricado sintéticamente mediante carbono en forma de grafito, el cual se elabora empleando altas temperaturas y altas presiones utilizando para ello una prensa especial, como se muestra en la figura 3.2. Mediante la aplicación de altas temperaturas y presiones la estructura hexagonal del grafito cambia a una estructura cúbica de diamante. En la práctica, sin embargo, la necesidad de altas temperaturas y presiones se puede ver reducida mediante el uso de catalizadores y solventes, tales como el níquel, el cobalto, hierro, o algunas otras aleaciones. Después del proceso de transformación, la masa embebida con los cristales de diamante se separan en una cámara reactiva los catalizadores y el solvente mediante un ácido. Después de este proceso el diamante es empleado para diferentes aplicaciones tales como piedras de esmeril, herramientas de corte, piedras abrasivas, etc.

### 3.3.3.2. HERRAMIENTAS DE CORTE DE DIAMANTE

Las herramientas de diamante policristalino están disponibles comercialmente tanto en forma de pastillas como en forma de disco sólido. Las herramientas de diamante policristalino se forman con pastillas que tienen substratos de carburo de tungsteno. Los productos estándar de las pastillas de diamante tienen un espesor de 1.6, 3.18 y 8 mm y las más grandes llegan a ser de 71 mm.

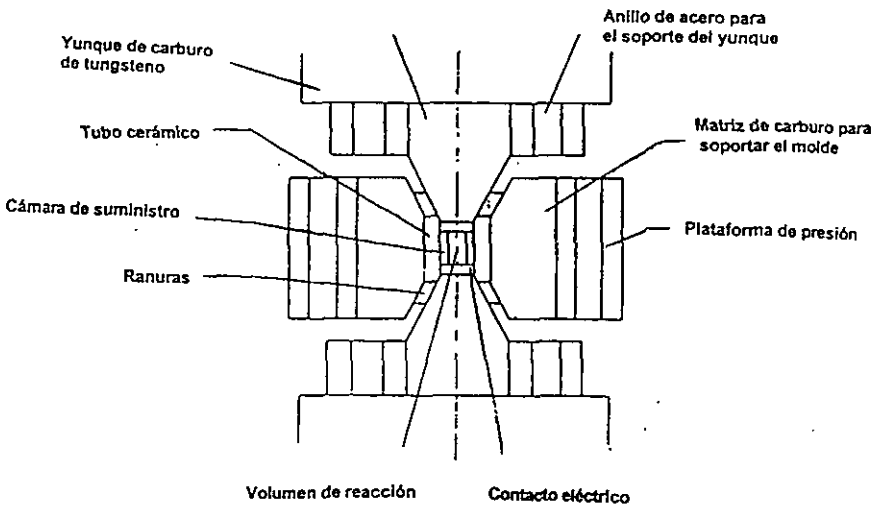


Figura 3.2. Método de fabricación del diamante industrial<sup>IV</sup>

<sup>III</sup> Metals Handbook, Machining, Vol 16, 1989, ASM International

<sup>IV</sup> Metals Handbook, Machining, Vol 16, 1989, ASM International

Los espesores de las pastillas de diamante varían de fabricante a fabricante, pero estas se encuentran usualmente entre 0.3 mm y 1.5 mm. En los últimos años se han desarrollado varios grados que se basan en diferentes tamaños de las partículas que van de 2  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  y 25  $\mu\text{m}$ .

### 3.3.3.3. FABRICACIÓN DE LAS HERRAMIENTAS DE DIAMANTE.

**Corte de las pastillas de diamante.** Se elaboran pequeñas piezas de diamante y son fabricadas mediante el método de descargas eléctricas con alambre (EDM), sin embargo, no todas las máquinas tienen suficiente potencia para el corte de las pequeñas pastillas de diamante debido a su baja conductividad eléctrica.

**Soldado con latón.** El siguiente paso en la fabricación de las herramientas es soldar con latón cuidadosamente la pastilla de diamante en un portaplaca de acero o carburo cementado. Para soldar la pastilla a la portaplaca se emplean aleaciones de plata con una bajo punto de fusión en el rango de 600 a 750° C. Se debe tener sumo cuidado cuando se sobrecalienta la pastilla de diamante, ya que un sobrecalentamiento puede causar que el diamante se revierta a grafito. La superficie de asiento debe estar adecuadamente preparada y limpia ya que es sumamente importante para el montaje. El calentamiento puede ser efectuado con una flama de oxi-acetileno, pero de preferencia el soldado debe ser por inducción, con lo cual se logra un alto grado de control.

**Afilado de la herramienta.** Después de montar la herramienta en el portaplaca, es necesario afilar y fabricar los radios de los flancos, quitando los daños provocados por el alambre de corte los cuales son aproximadamente 0.05 mm de profundidad y una vez efectuada esta operación se procede a generar los requerimientos de la geometría de corte y la calidad de los ejes. Debido a que el diamante es extremadamente duro se pueden presentar problemas durante el afilado. Para el tipo de zanco de estas herramientas, es aconsejable emplear herramientas muy rígidas y afiladoras de cabezas en forma de rueda para facilitar la creación de los ángulos necesarios.

**Descargas eléctricas de la molienda.** Un gran número de fabricantes han introducido máquinas mediante las cuales, se reemplazan las piedras abrasivas de esmeril convencionales por piedras de grafito, y una descarga eléctrica es aplicada entre la rueda y la herramienta. Este maquinado con descarga eléctrica (EDM) rotatorio tiene la ventaja de que los perfiles de la rueda de grafito pueden ser empleados para producir perfiles similares en la herramienta, además no existe contacto físico y por consiguiente no hay fuerzas, pudiéndose emplear para fabricar herramientas muy complejas o delicadas. En herramientas de forma con ejes de corte largos, el corte con alambre EDM es frecuentemente empleado para hacer una pre-forma. Para evitar el desarrollo de esfuerzos inaceptables, se recomienda que la pieza se preforme antes del soldado. Una vez soldado en el cuerpo del cortador se procede a afilar hasta dar el perfil deseado a la herramienta. Al final se corta con bajos niveles de potencia y bajas velocidades de corte, en donde el alambre de corte penetra

simplemente en el diamante produciendo el corte final de los ejes con un daño despreciable del proceso de EDM.

**Pulido.** La mayoría de los fabricantes de herramientas en el mundo pulen las herramientas hasta dar un acabado espejo. Esto mejora el flujo de la viruta al pasar por la superficie de la herramienta durante el maquinado, dejando la forma de la herramienta con ejes más agudos y mejoran la habilidad de las herramientas de diamante (PKD), para resistir la formación de ejes recrecidos. Además las herramientas pulidas son mucho más atractivas para el comprador.

### 3.3.3.4. APLICACIONES DEL DIAMANTE.

Aunque muchos ingenieros y operadores de máquinas de corte con diamante no tienen mucha idea del maquinado con herramientas de diamante, existen herramientas de PKD disponibles en diferentes grados, similar a lo ocurrido con las herramientas de carburo. Y al igual que el carburo, las propiedades del grado de PKD deben ser seleccionadas para efectuar maquinados de materiales en particular u operaciones de maquinado. Si un ingeniero de manufactura tiene que cortar una gran cantidad de aluminio A390 con PKD, él puede usar probablemente la misma herramienta para maquinar las primeras muestras sin mucha dificultad (aunque el resultado no pueda ser el óptimo). Sin embargo, si su experiencia es con el maquinado de A380 ó A356 él podría ser desafortunadamente sorprendido si intenta emplear PKD para maquinar otro tipo de materiales.

El diamante, al igual que el carburo, son partículas de alta dureza. Los granos de carburo de tungsteno, sin embargo son cementados con aleaciones de cobalto, mientras que los cristales de PKD son fundidos a muy altas presiones y temperatura con la ayuda de un catalizador rico en cobalto. Este enlace de diamante con diamante es una de las razones por las cuales, el PKD es una de las herramientas más resistentes a la abrasión.

La media del tamaño de los cristales del diamante determina el grado de la herramienta de corte. Muchos fabricantes de herramientas ofrecen las herramientas de corte en tres diferentes grados: fino, mediano y burdo. Como regla general, en las herramientas de diamante se encuentra que los de grano mas fino son los mejores para obtener superficies más finas, y los de grado más burdos son las mejores, por su alta resistencia, para la elaboración de piezas para la abrasión. Las herramientas de corte de diamante de grado medio son las mas comúnmente empleadas por su alto rango de aplicación. Estas herramientas están compuestas de cristales de 5 a 10  $\mu\text{m}$  de diámetro promedio. Las herramientas de corte de grado fino tienen de 2 a 4  $\mu\text{m}$  del diámetro medio del cristal y son empleadas solamente en partes tales como pulido de superficies de componentes ópticos y en donde el acabado superficial es muy crítico.

Las herramientas de diamante de grado burdo contienen cristales con un diámetro medio de 25  $\mu\text{m}$ . Esto generalmente se emplea para el maquinado de aluminio con alto contenido de silicio, plásticos con fibra de vidrio, y para el fresado. Debido a su forma, este material se emplea en el maquinado de materiales abrasivos con cortes interrumpidos, este grado tiene una tenacidad y resistencia adecuada para el maquinado de aluminio. Se obtienen pocos beneficios cuando se maquina con diamante con tamaños de grano mayores a 25  $\mu\text{m}$ . Sin embargo con cristales más grandes no se tiene ningún beneficio en la vida de la herramienta y cuando se pulen estas herramientas puede degradarse fácilmente en su superficie. Con una geometría de corte adecuada y unos parámetros de maquinado propios, las herramientas de diamante burdas pueden fácilmente mantener un acabado superficial igual o mejor de 2.5 micrones en  $Ra^V$ .

Una alternativa para el diamante que se encuentra en el mercado, es el diamante recubierto por el proceso CVD. Este producto se base en una delgada capa de recubrimiento de diamante de por lo menos 10  $\mu\text{m}$  de espesor. Cuando los ingenieros de manufactura planean emplear este tipo de herramienta tienen algunas desventajas. La capa de diamante frecuentemente se emplea en herramientas cerámicas tales como  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y la fragilidad de estas herramientas son tan críticas que se fabrican entonces con geometría positiva. El delgado espesor en los ejes de corte tiene también un pequeño soporte y se pueden romper fácilmente.

Si se emplea una película gruesa de diamante, esta puede ser seccionada y soldada en herramientas de carburo siendo mucho mejores que el diamante. Sin embargo, la aleación de latón no debe impregnar el diamante CVD, porque el resultado de la unión con latón es mucho más débil que la unión de diamante, y solo se emplea para cortes interrumpidos y ligeros (acabado final). La película de diamante CVD trabaja mucho mejor que el diamante. Sin embargo, los problemas en la aplicación de la soldadura dificultan la fabricación de herramientas de CVD de diamante y generalmente estas, no son tan robustas como las herramientas de diamante. La nueva generación de herramientas de CVD que están actualmente en el mercado, tienen características de mejor aplicación y menor costo empleando carburo de tungsteno recubierto con una delgada película de diamante.

### **3.3.4. HERRAMIENTAS DE HSS CON RECUBRIMIENTO.**

Los machuelos de acero rápidos de alta velocidad son los que se emplean con mayor frecuencia debido a las características básicas, ya que estos no llevan tratamiento superficial adicional. Sin embargo, para aplicaciones especiales, se recomienda elevar la resistencia al desgaste y reducir la tendencia a la

---

<sup>V</sup>  $Ra$ . Es la rugosidad promedio entre los valles y las crestas de la superficie evaluada

soldadura y al deslizamiento, por medio de un tratamiento de endurecimiento superficial especial.

a) **Revestimiento con TiN, TiAlN y TiCN.** Los recubrimientos aportan en general las siguientes ventajas:

- Permiten el uso de mayores velocidades de corte, sin reducir el tiempo de utilización. El rendimiento óptimo para el caso concreto de una determinada aplicación debe obtenerse por medio de ensayos.
- Mejora notable el tiempo de utilización por medio de disminución del desgaste de la herramienta.
- Con una velocidad de corte alta, aumenta la diferencia de potencial entre la herramienta con o sin recubrimiento. La diferencia es tan considerable, que las herramientas con o sin recubrimiento no son comparables en la práctica.
- Se emplean parámetros de corte elevados logrando un aumento en la productividad, así también, se ahorran gastos no sólo en la adquisición de herramientas sino también con el tiempo del cambio de máquina y herramienta.

Este tipo de recubrimientos son ampliamente empleados en machuelos o en formadores debido principalmente al maquinado que realizan.

b) **Nitrurado.** El Nitrurado es la segunda posibilidad que se tiene para fabricar los machos más resistentes al desgaste. Este tipo de recubrimiento se emplea por lo general en el maquinado de materiales como fundición gris, aluminio con gran contenido de silicio, plásticos, aceros con alto contenido perlítico, etc. Los machos con recubrimiento de nitruro están disponibles por lo general para machuelos, formadores y brocas y su principal aplicación en el caso del aluminio es aumentar los parámetros de corte, incrementando la productividad, y ampliando la vida de la herramienta.

c) **Cromado duro.** El cromado duro como tercera posibilidad de mejorar la resistencia al desgaste. Se pueden emplear en las herramientas principalmente de barrenado y formado. Las herramientas tratadas de este modo, reducen particularmente la resistencia al deslizamiento y con ello, la fuerza de corte. Esta ventaja, sin embargo, desaparece cuando la temperatura de maquinado supera los 250 °C.

d) **Tratamiento de vaporizado.** Los machos tratados al vapor también ofrecen una menor resistencia al deslizamiento. De este modo se pueden evitar económicamente las soldaduras en frío, que tienden a aparecer en el maquinado de aceros pobres en carbono. Los machos tratados al vapor solo pueden ser empleados en materiales ferrosos.

e) **Pavonar.** El proceso de pavonado tiene lugar en una solución acuosa con temperaturas escasamente por encima de los 100 °C. Las soluciones contienen materiales oxidables, como nitruros, nitratos y/o materiales colorantes, (por ejemplo el fosfato). Las bajas temperaturas no afectan la dureza de los aceros con baja resistencia.

Durante el pavonado se forma una capa negra que se compone principalmente de óxido de hierro magnético ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Estas capas se producen a través de sulfinado, en la cual se selecciona primordialmente el tratamiento con vapor de agua por motivos de protección ambiental.

Las capas de óxido, sólo son de pocas micras de espesor. En contraposición al material principal tiene un carácter no metálico. Como propiedades más importantes hay que mencionar un bajo coeficiente de fricción, así como buena resistencia contra la corrosión y el desgaste. Particularmente se reduce el desgaste por adhesión y así se evita el peligro de soldadura con material a maquinar.

#### **3.3.4.1. VENTAJAS IMPORTANTES DEL RECUBRIMIENTO:**

- a) Las herramientas recubiertas aportan notables mejoras en el rendimiento, comparadas con las condiciones de corte sin recubrimiento.
- b) También puede aumentarse considerablemente la velocidad de corte, y aun así, obtendrá la misma duración como con herramientas sin recubrir.
- c) Conforme se aumenta la velocidad de corte, aumenta también la diferencia entre herramientas recubiertas y sin recubrir, debido a que con mayores velocidades de corte aumenta la productividad enormemente.
- d) Es factible también el aumento simultáneo de la velocidad de corte y el avance.
- e) Mejora la calidad del barrenado, ranurado o roscado, expresado mas concretamente en aproximadamente un 50% menos de rugosidad. La razón se debe a que se tienen unas mejores características de deslizamiento y menores soldaduras en frío.
- f) Elevada dureza en la capa superficial y mayor dureza que los metales duros.
- g) Espesor de capa uniforme con suaves contornos y que apenas se ensanchen sin redondez en los cantos del radio. El grosor de la capa es de apenas unas pocas micras, dependiendo del tipo de herramienta.
- h) Estructura óptima de la capa, estructura de grano muy fino y denso.
- i) Adhesión extraordinaria de la capa por difusión.
- j) Poca conductividad térmica y por ende menor daño por calor en el material base y por lo tanto ninguna merma en la dureza de la herramienta.
- k) Mejor deslizamiento y por ende una reducción de las fuerzas de corte.

### 3.4. MATERIALES DE LAS HERRAMIENTAS COMÚNMENTE EMPLEADAS EN EL MAQUINADO DEL ALUMINIO.

En la actualidad existen solo tres tipos de materiales que se recomiendan para el maquinado del aluminio con bajo contenido de silicio, porque ofrecen la posibilidad de emplear mejores parámetros de corte y obtener los mejores resultados tanto en calidad como productividad. Esto no significa que solo se limita a emplear estos materiales, sino la experiencia muestra que las características de estos materiales proporcionan una excelente vida de herramientas, altos niveles de producción, certidumbre en la calidad de la pieza, etc. El carburo de tungsteno, materiales con recubrimientos y el diamante, son los materiales mas usados en los procesos de maquinado de aluminio. Como se verá posteriormente estos materiales poseen características particulares que les permiten tener excelentes condiciones de corte, alta resistencia al desgaste, altas velocidades de corte, altos avances, alta resistencia térmica, etc., aunque también presentan grandes desventajas como elevados costo, baja resistencia a la fractura, etcétera.

Es importante notar que estos materiales se emplean específicamente según la herramienta que se va a emplear. El diseño y el material de las herramientas nacen desde la conceptualización del proceso de maquinado hasta que el proceso se encuentra en la línea de producción, pasando por las diferentes etapas de prueba, primeras piezas prototipo para certificación del cliente, primeras piezas muestras que el cliente exige e inicio de producción. Estas etapas permiten verificar la efectividad de la herramienta, porque de otro modo, existe la posibilidad de que este material y el diseño de la herramienta puedan cambiar en un momento determinado, debido a los problemas que estas puedan ocasionar en las líneas de producción.

No existe una regla general para la selección del material que se va a emplear para el diseño y fabricación de la herramienta de corte, sin embargo, existe un criterio que se basa en las condiciones de corte y en los costos de producción:

**Brocas.** El material de las herramientas que se emplean en el maquinado de aluminio es de carburo de tungsteno y con recubrimiento de carbonitruro de tungsteno, porque estos materiales facilitan el maquinado del aluminio y sus aleaciones, además, provee una alta durabilidad y altos parámetros de operación. El costo aproximado de estas herramientas (depende un poco de lo complejo de ellas) es de 120 dólares.

**Formadores.** El material base de estas herramientas es de HSS recubiertas con Nitruro de tungsteno, nitruro de cromo o combinadas con cobalto. Debido al tipo de corte que se realice con ellas, es necesario contar con una estructura central suave para resistir los esfuerzos cortantes y una capa exterior endurecida para aumentar la vida de la herramienta. El costo promedio de estas herramientas es de 25 dólares.

**Escariadores.** Los escariadores también conocidos como rimas en el argot industrial, se elaboran mediante

un mundo de combinaciones de diferentes materiales, ya que de ellas depende el acabado interior de un barreno así como el mantener agujeros perfectamente redondos, esto depende básicamente del fabricante. Algunas de las herramientas más comunes en la industria se fabrican de carburo sólido (Gühring), otras se fabrican con el zanco de HSS y pastillas de carburo soldadas en la punta con latón (Dihart), las mas elaboradas y costosas son las rimas de inserto de diamante en un zanco de carburo (Mapal) y las rimas de alta precisión (IT5) las cuales están formadas mediante un inserto de carburo o diamante y un inserto semi-redondo en el lado opuesto. Este inserto se encuentra de 2 a 5 micras mas abajo del inserto cortante, la función de este inserto redondo es aplicar un rolado al barreno después de que se ha cortado con el inserto de carburo o diamante, garantizando las tolerancias geométricas del barreno. Por lo general estas rimas llevan barrenos interiores para el soluble. El costo de estas herramientas es muy variado, ya que depende si son de carburo o diamante. Para el caso de rimas de carburo su costo aproximado es de 150 dólares y en el caso de rimas con insertos de diamante es aproximadamente de 1,500 dólares.

El proceso de rimado es un proceso de alta precisión, el cual depende de muchos factores en los sistemas de alta producción. Entre ellos puede mencionarse la calidad del soluble, la concentricidad del husillo, la estabilidad de la máquina, etc. por lo mismo la mayoría de las rimas (a excepción de las de carburo sólido) son susceptibles de tener un pequeño ajuste en diámetro.

**Cortadores.** Quizá una de las herramientas más empleadas en la industria metal - mecánica para maquinado de aluminio. Esta herramienta presenta una infinidad de formas y materiales que permiten el maquinado casi de cualquier tipo de superficie. Por lo general, los cortadores pequeños se elaboran de carburo sólido y los grandes se elaboran con diferentes tipos de insertos. Actualmente sólo se emplean cortadores de carburo en el maquinado de formas rebuscadas de la pieza y cortadores de diamante para planear, con lo cual se logra obtener excelentes acabado y se reduce el tiempo de maquinado.

### **3.4.1. CARACTERÍSTICAS DE CONSTRUCCIÓN DE INSERTOS INTERCAMBIABLES**

Desde que comenzó el desarrollo de los insertos, éstos se han utilizado desde las brocas, machuelos hasta los cortadores, pero no en todos los casos ha dado un resultado satisfactorio debido al costo tan alto que esto representa. Pero existen algunos criterios para poder determinar la efectividad del empleo del inserto intercambiable. Estos criterios se fundamentan en las siguientes:

- a) Alta duración del cuerpo de la herramienta
- b) Alta concentricidad y planeidad del cuerpo de la herramienta.
- c) Fijación segura y fiable de los insertos intercambiables.
- d) Alta exactitud de posicionamiento al cambiar y dar vuelta a los insertos intercambiables
- e) Cambio fácil y rápido de los insertos



- f) Evacuación fácil de la viruta y larga duración del inserto.
  - g) Geometría de corte en función del material de corte.
- 
- a) **Alta duración del cuerpo de la herramienta.** Debido a las grandes exigencias de los cuerpos de las herramientas estos son muy costosos. Teniendo en cuenta una buena amortización se exige una duración correspondiente. Esto se consigue seleccionando bien el material y con un tratamiento térmico adecuado, que proteja al cuerpo de la herramienta contra la deformación y daños por golpes.
  - b) **Alta concentricidad y planeidad del cuerpo de la herramienta.** Los defectos en la planeidad del cuerpo de la herramienta, sobre todo en el alojamiento del inserto se transmiten por el sistema de fijación al inserto influyendo por lo tanto, en el fresado de planear o carear, particularmente en la calidad de la superficie. Los defectos en la concentricidad dan origen a una carga irregular de los filos y, por consiguiente, a un desgaste del destalonado y de la superficie de desprendimiento de distintos grados.
  - c) **Fijación segura y fiable de los insertos intercambiables.** El sistema de fijación, entre otros, es responsable del comportamiento de oscilación de la herramienta y es decisivo para el tipo y el grado de esfuerzos térmicos y de ruptura por flexión del inserto.
  - d) **Alta exactitud de posicionamiento al cambiar y dar vuelta a los insertos intercambiables.** La exactitud de posicionar los insertos al cambiarlos se refiere a las faltas de medida y del ángulo que hay que atribuir al meterlas y fijarlas. Depende en gran medida del sistema de fijación seleccionado, de la tolerancia y de la forma del alojamiento del inserto. Fallas en el posicionamiento de los insertos tienen el mismo efecto que los defectos en la concentricidad o planeidad del cuerpo de la fresa.
  - e) **Cambio fácil y rápido de los insertos.** El cambio fácil y rápido de los insertos influye en los tiempos de preparación y por lo tanto, se manifiesta plenamente en los tiempos de producción. Depende del sistema de fijación.
  - f) **Evacuación fácil de la viruta y larga duración del inserto.** El problema de la evacuación de las virutas y la duración de los insertos hay que diferenciarlos según las aplicaciones, puesto que se exigen distintas cualidades de las herramientas para maquinar diferentes materiales con diversas condiciones de corte. Lo esencial para el resultado de la operación es, aparte del material de corte, la construcción de la herramienta con respecto a la cámara de la viruta, al paso del diente o filos de la herramienta, a la geometría de la herramienta, etc.
  - g) **Geometría de corte en función del material de corte.** Este sistema permite colocar el tipo de inserto con la geometría de corte adecuada para el material que se va a trabajar.

- 
- <sup>1</sup> Juneja, B.L and Sekhon G.S. , " Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools" John Wiley and Sons, 1987.
- <sup>2</sup> Taylor F.W. " On the Art of Cutting Metals" Trans, ASME, vol 28 pag 31 1906
- <sup>3</sup> Zorev, N.N. " Metal Cutting Mechanics" 1966
- <sup>4</sup> Moissan. H, " The eElectrical Furnace, V Lenher, Trans. Chimiical Publishing Company, 1904.
- <sup>5</sup> Schroeter K. U.S: Patent 1,549,615 1925

## Capítulo IV

# DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL MAQUINADO DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

### 4.1. INTRODUCCIÓN.

Las grandes industrias gastan millones de dólares anualmente en la compra de herramientas de corte, debido primordialmente a las exigencias geométricas y las tolerancias cada vez mas cerradas que actualmente requiere la industria automotriz. Esto aunado al desarrollo de nuevos materiales de corte con geometrías mas propicias, han permitido desarrollar herramientas sumamente complejas y completas para obtener los maquinados que la pieza requiere. Así estas empresas buscan un equilibrio entre la resistencia al desgaste, la resistencia al impacto, tenacidad y la resistencia al choque térmico como se muestra en la figura 4.1. La tabla 4.1 muestra algunos de los fabricantes de herramientas de carburo más importantes en el mundo, así como la simbología que utilizan para definir el material equivalente para cada uno de estos fabricantes.

Las empresas metal - mecánicas cuyo giro principal es el maquinado de piezas de aluminio, presentan una fuerte tendencia al empleo de herramientas de carburo y herramientas con insertos de diamante, por ser el aluminio relativamente suave (Al - Si menor al 10 %) y dada la alta resistencia al desgaste que presentan estos materiales, los cuales en función de la relación beneficio - costo son mucho mas rentables y proporcionan mayor estabilidad durante los procesos de corte. Pero a pesar de ser herramientas extremadamente duras están sujetas a un agresivo desgaste, el cual es determinante, ya que la herramienta mantiene su filo de corte vivo y la falla se presenta ya casi al final de su vida útil, mostrándose directamente en el acabado de la pieza.

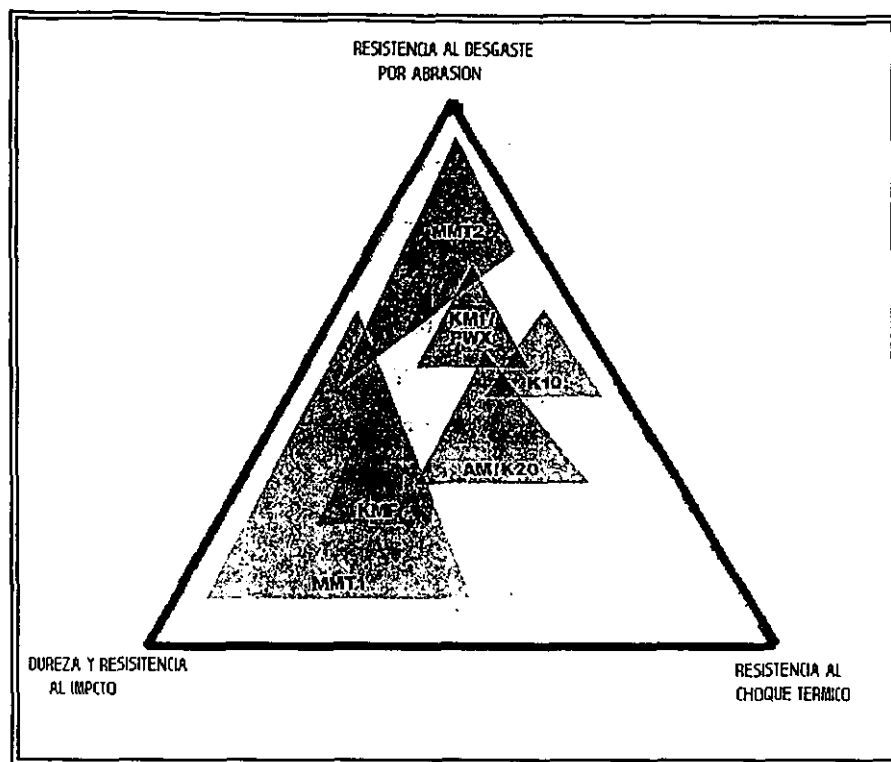


Figura 4.1 Propiedades relativas de los diferentes fabricantes de insertos de carburo<sup>1</sup>

HERTEL	CARBOLOY	KENNAMETAL	SANDVIK	VELENITE
KM1	895	k68	HM	VC29
Micromet 2	999	k11, k313	H1P	VC3
K10	895	k68	H10	VC2
PWX	895	K68	H13A, HM	VC29
AM	883,875	K6, K6735	H20	VC2, VC28
K20	883	K6, K6735	H20	VC2, VC28
KMF	999	K313	H1P	VC3
Micromet 1	820	K1	H10P, R4	VC101

Tabla 4.1. Cuadro comparativo de equivalencias de materiales para diferentes insertos de carburo en función de sus propiedades relativas.<sup>2</sup>

Existe una gran diversidad de factores que están involucrados en el desgaste de las herramientas de corte, pero ese desgaste está directamente sujeto al tipo de proceso. Enseguida se hará mención de los

<sup>1</sup>Catálogo de información técnica "Carboly"

<sup>2</sup> Catálogo de información técnica "Carboly"

procesos más importantes en el maquinado de aluminio:

a) **Proceso de desbaste de una superficie.** A pesar de que el proceso de desbaste solo se utiliza para retirar grandes cantidades de material durante el fresado, es importante resaltar que conforme se va desgastando el inserto, va aumentando la fuerza de corte. El aumento en el consumo de potencia de la máquina y los esfuerzos a los que se ve sometida la máquina cuando ésta se desplaza de un punto a otro en cualquiera de sus ejes (X,Y,Z), es una manera de determinar el grado de desgaste que sufre la herramienta, el cual se manifiesta en un cambio del ruido que éste ocasiona durante el maquinado y una notable diferencia en el acabado superficial de la pieza, en base a este fenómeno la herramienta se desmonta de la máquina y se lleva a evaluar en un comparador óptico y a la superficie fresada se le analiza la rugosidad y la planicidad corroborando que la herramienta todavía cumple con la calidad requerida por el cliente.

b) **Proceso de acabado de una superficie.** En los procesos de maquinado de aluminio existen algunos factores que indican cuando una herramienta ya no es apta y se requiere emplear una nueva, entre ellos:

- Cuando el acabado superficial de la pieza queda con vibraciones muy marcadas y no cumple con las especificaciones de rugosidad.
- Cuando las características de rugosidad marcada en el plano de maquinado están fuera de especificación.
- Cuando la superficie comienza a dejar una rebaba en las orillas de la pieza maquinada lo suficientemente grande que impide que el operador la pueda retirar mediante una rasqueta.

c) **Proceso de barrenado.** Dentro de los procesos de barrenado existen diversas circunstancias que no son directamente apreciables para efectuar el cambio de la herramienta ya que en una gran cantidad de ocasiones la broca que se emplea es para realizar un precorte, entre otras, tenemos:

- Proceso de precorte para cuerdas:
  - Diámetro interior de la cuerda pequeño. Este se presenta cuando se está utilizando un formador nuevo y el diámetro de núcleo de la cuerda es chico, esto se debe fundamentalmente a que los filos de la broca están rotos o exageradamente desgastados.
  - El diámetro interior de la cuerda es grande. Este se presenta cuando se está maquinando con un formador nuevo y en diámetro esta fuera de especificación debido a que se ha presentado un desgaste de la punta de la herramienta de filos recreados o se está fundiendo el material en la punta de la herramienta. Este punto es de suma importancia para la concentración del soluble y la cantidad que cae en la punta de la herramienta de

corte.

■ **Proceso de precorte para el rimado.**

- El desgaste de la broca de precorte se manifiesta principalmente porque el rimado comienza a aparecer cónico u ovalado.

d) **Proceso de formado.** La principal causa del desgaste de esta herramienta se manifiesta en el diámetro núcleo de la cuerda grande, ocasionado principalmente por el gran esfuerzo mecánico que se presenta al momento de efectuar el proceso, manifestándose como un desgaste por cargas térmicas o/y mecánicas. Por tal motivo esta herramienta requiere que la concentración del soluble sea alta (5 al 7 % de aceite soluble).

e) **Proceso de machueleado.** La principal causa del desgaste de esta herramienta es el diámetro de núcleo grande, es decir, se comienzan a desgastar los filos de corte.

f) **Proceso de rimado.** Existen varias maneras de verificar el desgaste de una herramienta de rimado, entre otros:

- Cuando el acabado que la herramienta deja en el barreno es muy rugoso o tiene mal aspecto.
- Cuando el barreno se encuentra fuera de especificación
- Cuando la herramienta está bien centrada, pero el barreno que esta herramienta deja es cónico.

## **4.2. CRITERIOS DE DESGASTE EN LAS HERRAMIENTAS**

Hasta el momento, la teoría del desgaste de las herramientas es sumamente compleja, esto es debido principalmente a que no es posible determinar claramente el desgaste natural en una herramienta, ya que en la práctica encontramos que el desgaste del mismo tipo de herramienta, del mismo material y forma no es repetitivo, además, se presentan diferentes tipos de desgastes, esto es claro, debido a las grandes variaciones que existen dentro de los procesos de maquinado (variaciones en temperatura, variación en las presiones de sujeción, concetricidad de la herramienta, defectos propios de la herramienta, etc.), es por ello, que los criterios de desgaste de las herramientas son tan relativos que pueden llegar a confundir a los herramentistas. Aún así, es posible determinar mediante ciertos patrones marcados en la herramienta cual fue el tipo de desgaste al que estuvo sujeta y en función de ello, determinar las causas que ocasionaron el desgaste y tomar las acciones correctivas pertinentes.

### **4.2.1 GENERALIDADES**

Uno de los grandes problemas que en la actualidad se vive en el ambiente industrial es poder determinar fehacientemente la durabilidad de una herramienta de corte, ya que en la práctica se presentan una serie de circunstancias indirectas que ocasionan desgastes prematuros o larga vida a la herramienta. Lo más crítico de estos hechos es no poder establecer parámetros de medida para poderlos cuantificar. Además, el costo de las herramientas con un costo menor a 3,000 marcos alemanes corre a cargo del fabricante de la pieza. Es por ello que existe gran preocupación por obtener el mayor provecho de las mismas, implementado diversos criterios para poder diagnosticar la vida de las herramientas.

Uno de los criterios más socorridos en la industria para poder determinar la vida de las herramientas consiste en establecer primeramente los parámetros de corte propuestos por los fabricantes de herramientas. Sin embargo, estos parámetros de corte son para condiciones de maquinado muy generales, por lo que en una diversidad de ocasiones se tiene que jugar con ellos para poder mantener la calidad de la pieza maquinada, pero influye directamente en la vida de la herramienta y en el tipo de desgaste.

Otro criterio bastante empleado en la industria es el tomar los parámetros de corte que el fabricante propone y alterarlos para estudiar el comportamiento del maquinado en otras condiciones, tratando de encontrar las condiciones óptimas de maquinado para el proceso en estudio. Es importante resaltar que los parámetros de corte propuestos por el fabricante son totalmente controlados y regulados en laboratorio y no en la práctica. Es por ello que existen ciertos factores que no son tomados en cuenta por el fabricante de herramientas: el tipo de sujeción al cual está sometido, tipo de función, potencia de la máquina, estabilidad de la máquina, geometría de la máquina, tipo de piso en donde se encuentra cimentada o colocada la máquina, material de la fundición, acabado y tolerancias geométricas, etc. Esto lleva a concluir que las condiciones obtenidas empleando solamente la teoría de corte sin considerar todas las variables que están presentes en la práctica hace prácticamente imposible lograr las condiciones de corte óptimas.

Este hecho ha ocasionado que se investiguen diversos métodos y se traten de modelar matemáticamente para poder determinar la vida de una herramienta, como lo muestra el desarrollo realizado por Taylor a principios de siglo. Muchos otros estudios se han llevado a cabo como es el caso de los modelos matemáticos propuestos por König and DePiereux, etc. y algunos criterios de desgaste propuestos por Murphy. Pero el desarrollo tecnológico indica que hasta la fecha sólo los criterios de vida de herramienta pueden brindarnos una duración aproximada de las herramientas, sin olvidar que estos son casos específicos por proceso.

## **4.2.2. DESGASTE Y VIDA DE LAS HERRAMIENTAS**

El desgaste de las herramientas de corte se presenta porque las cargas normales en la superficie de desgaste son grandes y el corte de la viruta y la pieza en donde se aplican esas cargas se están moviendo rápidamente sobre la superficie de corte. Las acciones de la velocidad de corte y la fuerza de fricción en la superficie de contacto incrementan la temperatura del material de la herramienta, lo cual ocasiona que se aceleren las reacciones químicas y físicas asociadas con el desgaste de la herramienta, por lo tanto, el desgaste de la herramienta es un problema que se incrementa potencialmente conforme transcurre el tiempo de maquinado.

Para obtener un manejo cuidadoso de los procesos de maquinado, los ingenieros de manufactura y producción necesitan establecer una metodología con la cual se tenga un mejor control sobre la duración de las herramientas:

- a) Seleccionar el centro de maquinado más idóneo y las herramientas de corte para obtener las características geométricas de la pieza al ser maquinada para un material en particular.
- b) Asegurar que el sistema de distribución de las herramientas proporcione siempre la misma calidad de la geometría de las herramientas.
- c) Seleccionar correctamente los parámetros de corte (velocidad de corte, avance, etc.) y la correcta geometría de corte para el material a maquinar.
- d) Establecer monitores dentro y fuera de las líneas de producción de las condiciones de las herramientas de corte y la calidad de la superficie maquinada por las herramientas.
- e) Tener un procedimiento de mantenimiento que asegure consistentemente las operaciones de los centros de maquinado.
- f) Tomar en consideración los costos de los centros de maquinado y la utilización de las herramientas, para brindar una clara idea de los objetivos económicos para los sistemas de maquinado.

La metodología especificada en los 6 incisos anteriores permite determinar cuando se presenta alguna anomalía en la calidad del producto y como primera instancia se recomienda verificar las herramientas de corte, debido a que cualquier variación en el comportamiento de un proceso estable, por lo regular es ocasionada por el desgaste de las herramientas. Desafortunadamente, existen muchas variables involucradas directa e indirectamente en los procesos de maquinado de aluminio, es por ello que la única manera de poder determinar claramente la vida de las herramientas es llevar un estudio continuo y conciso del tiempo de trabajo de la herramienta.



### 4.2.3. AMBIENTE DE DESGASTE

El desgaste ocurre a lo largo de los ejes de corte y en un eje adyacente de la superficie. La figura 4.2. muestra una vista del proceso de corte en el cual la superficie de incidencia y la superficie de desahogo se interceptan para definir el eje de corte.

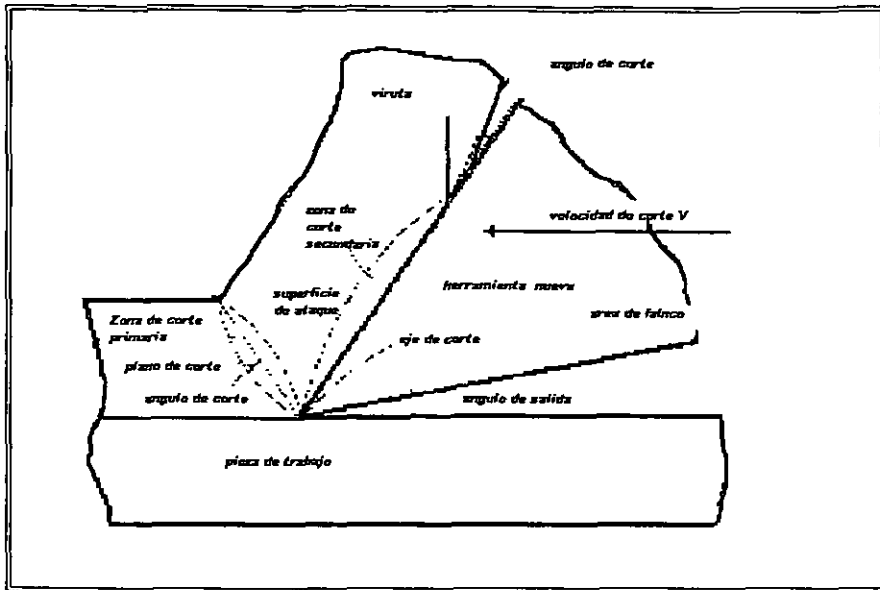


Figura 4.2. Desarrollo del proceso de corte de viruta.<sup>3</sup>

- **Desgaste de la superficie.** La figura 4.3 muestra como la punta de la herramienta de la figura 4.2 se puede desgastar. A lo largo de la superficie de incidencia, el movimiento de la viruta y los altos esfuerzos normales tienden a producir un escarapelado de la herramienta denominado desgaste por cráter. A lo largo de la superficie de desahogo, el movimiento de la herramienta y los grandes esfuerzos normales tienden a incrementar el área de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, produciendo un desgaste de los flancos. Por último, el radio del eje de corte tiende a incrementarse. La figura 4.4 muestra las características de la superficie desgastada para insertos, cortadores rectos, herramientas de forma, brocas.

La figura 4.3 muestra como el proceso de desgaste cambia la geometría de los diferentes tipos de

<sup>3</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 37, volumen 16

herramientas de corte. El desgaste de los flancos reduce el diámetro de los cortadores rectos como también la profundidad de corte para las herramientas con inserto. Ambos cambios en la geometría de corte de la herramienta producen tolerancias fuera de especificación de la parte maquinada. El desgaste del eje y el desgaste por cráter en la superficie de incidencia alteran el estado de esfuerzos y deformación en la región del corte, y por lo tanto cambian la fuerza de corte y los procesos de generación de viruta. Los severos cambios en la geometría de la herramienta reducen el ángulo entre la superficie de incidencia y la superficie de desahogo provocando que la herramienta llegue al fin de su vida útil.

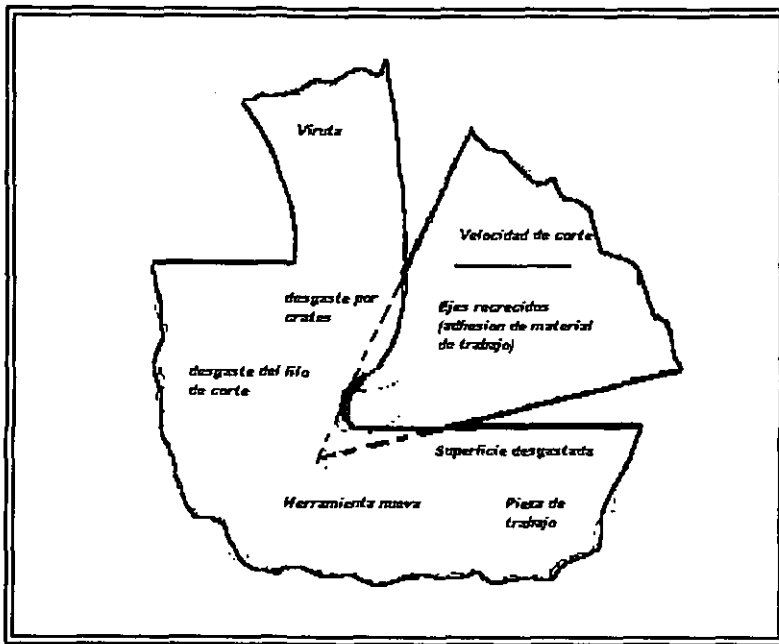


Figura 4.3 desgastes característicos de una herramienta\*.

\* Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 37, volumen 16

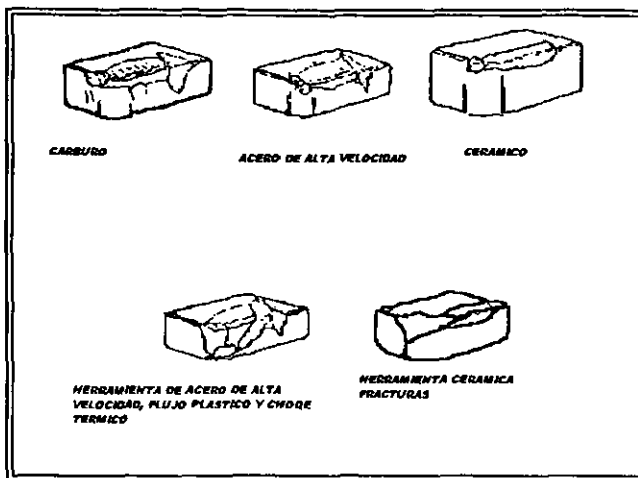


Figura 4.4. Superficies desgastadas de las herramientas mas comunes debido al movimiento de la herramienta.<sup>5</sup>

Aparentemente la localización y el tamaño de la superficie desgastada juegan un importante papel para determinar la vida útil de la herramienta de corte. La localización de los esfuerzos en la superficie de desgaste es el factor que contribuye para estimar la localización y tamaño de la superficie desgastada.

- **Esfuerzos en la superficie desgastada.** La figura 4.5 muestra aproximadamente una distribución de esfuerzos de corte y normales en la superficie desgastada de la herramienta. Los esfuerzos normales,  $\sigma_n$ , son provocados por las fuerzas normales que actúan a lo largo de la superficie de incidencia, la superficie de los ejes de corte y la superficie de desahogo. Adicionalmente a los esfuerzos normales se muestran los esfuerzos de corte  $\tau$ , que actúan a lo largo de la superficie de la herramienta y están asociados con las adherencia y deslizamiento del proceso de corte. Para la zona de adherencia, la fuerza normal tiene una magnitud que resulta de una de las componentes del esfuerzo cortante  $\tau_y$  y de la relación de dureza - deformación del material de la pieza de trabajo. En el deslizamiento a lo largo de la superficie la viruta tiende a adherirse periódicamente y a separarse del plano de fractura de corte. La existencia y tamaño de la zona de adherencia depende de la magnitud de la fuerza normal y el coeficiente de fricción a lo largo de la superficie. La zona de deslizamiento tiene una fuerza de fricción y está asociada con los esfuerzos de corte que varían en función de la fuerza normal y el coeficiente de fricción.

<sup>5</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 43, volumen 16

El estado de deformación generado por los esfuerzos cortantes asociados con las zonas de adherencia y deslizamiento en la superficie de incidencia son generalmente llamados las zonas secundarias de corte como se muestra en la figura 4.2. La superficie de la herramienta y las condiciones de lubricación afectan la magnitud de los esfuerzos cortantes en la superficie.

La zona primaria de corte se muestra en la figura 4.2, la cual se extiende desde los ejes de corte a la superficie y es la zona donde la viruta es deformada plásticamente y retirada del material de trabajo. El complejo estado de esfuerzos a lo largo de los ejes de corte es causado por las deformaciones asociadas con la separación de la viruta del material de trabajo, el movimiento a lo largo de la superficie de incidencia de la herramienta y el material deformado que permanece en la pieza de trabajo. Esta relación entre la deformación producida por el movimiento de la viruta y la deformación estacionaria en la pieza de trabajo produce la acción de arranque por los ejes de corte. Los esfuerzos normales llegan a ser tan grandes que exceden la resistencia del material de la herramienta, causando una deformación plástica o fractura de los ejes de corte de la herramienta. La zona de adherencia puede no existir para ciertas condiciones de corte, sin embargo, la acción de arranque a lo largo de los ejes de corte siempre existe en algún grado y es imposible crear un eje de corte sin radio y con la zona de corte primaria perfectamente plana. La magnitud de este estado de esfuerzos en la región de corte también varía con el tiempo y ocasiona fallas potenciales.

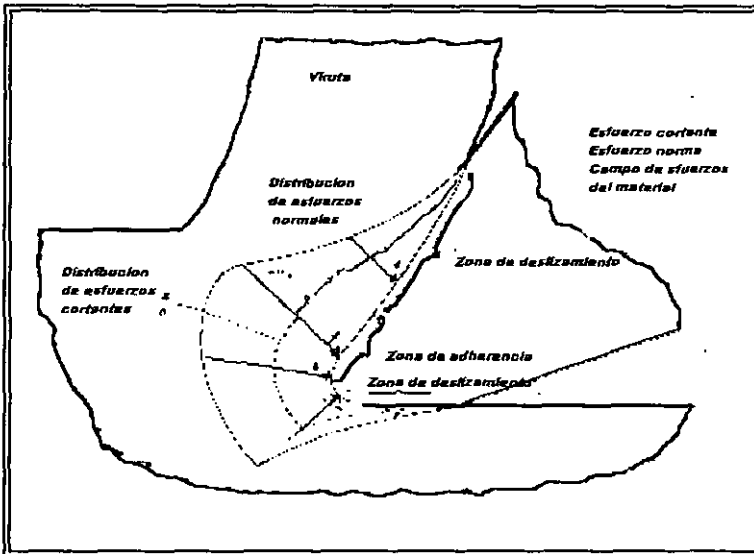


Figura 4.5. Esfuerzos en la superficie de incidencia de la herramienta de corte.<sup>6</sup>

<sup>6</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 38, volumen 16

- **Movimiento a lo largo de la superficie de desgaste.** Una de las maneras para incrementar la productividad durante el maquinado es incrementar la relación de volumen de viruta removido. La relación volumétrica de viruta removida es el producto del ajuste del área de la herramienta con el número de veces que se retira el material de trabajo, lo cual está en función de la velocidad de corte  $V$ ; así, opcionalmente para el proceso de fresado se tiene que incrementar la velocidad de corte. La productividad ganada debe ser balanceada contra el incremento del desgaste de las herramientas causado por las altas velocidades de corte.

La velocidad de corte es la velocidad relativa entre la superficie de desahogo de la herramienta y el material de trabajo, mientras que la velocidad de la viruta es la velocidad relativa entre la viruta y el ángulo de incidencia de la herramienta. La magnitud de esas dos velocidades y la relación de los esfuerzos de corte en esa interfase determinan la cantidad de energía térmica liberada por unidad de área de contacto. La magnitud de la velocidad de corte provoca una alta deformación en la zona primaria de corte y en la zona de adhesión. El volumen de material deformado en razón de la deformación libera adicionalmente energía térmica.

Esta energía térmica es la fuente de calor que provoca el incremento de temperatura del material de trabajo, la herramienta de corte y la viruta. La ganancia en productividad incrementa proporcionalmente la velocidad de desgaste de la superficie, la razón de la deformación, y la liberación de energía térmica.

- **Temperatura en la zona de desgaste.** La diferencia entre la energía térmica liberada y la energía térmica disipada determina la temperatura del material en esa zona de desgaste. La disipación de la energía térmica es una función de las propiedades térmicas del material de la herramienta de corte y del material de la herramienta de trabajo. Además el tamaño de la pieza y el calor específico determinan la capacidad calorífica de la pieza. La extensión de la superficie juega un papel preponderante en la transferencia de calor por convección. Si se está empleando fluido de corte, la transferencia de calor por conductividad y convección en la frontera entre la herramienta y el material de trabajo se realiza con mucho mayor rapidez.

El desarrollo y selección del material de la herramienta se basa en la habilidad de la herramienta para mantener su dureza, tenacidad y estabilidad físico - químicas a muy altas temperaturas. Al igual que con la mejor herramienta, esas propiedades eventualmente cambian adversamente con el incremento de la temperatura.

La figura 4.6. muestra una distribución de temperatura típica. El alto gradiente de temperatura puede causar que la herramienta tenga severos daños por los altos niveles de temperatura. La relación de la temperatura media resalta la importancia de las variables y sus efectos en temperatura. Las grandes tensiones en el material de trabajo originan altos valores de energía de corte específico. La mejor combinación de las condiciones de los materiales de las herramientas de corte y los efectos de la alta temperatura permiten conservar su dureza y su tenacidad para obtener una buena durabilidad de la

herramienta.

Los refrigerantes son una mezcla de lubricantes y constituyentes disipadores de calor, sin embargo su principal función es el de enfriar la herramienta. Los componentes de los lubricantes llegan a ser más importantes a bajas velocidades de corte, donde es menor el calor generado y mayor la tendencia de la viruta a adherirse a la superficie de la herramienta de corte.

La combinación de los efectos de la temperatura con los estados de esfuerzos, estado de deformación y el movimiento del material, provocan que la zona de desgaste de las herramientas de corte sea un complejo campo de esfuerzos mecánicos - térmicos en los cuales esas condiciones interactúan como detonadores de los mecanismos que causan el desgaste.

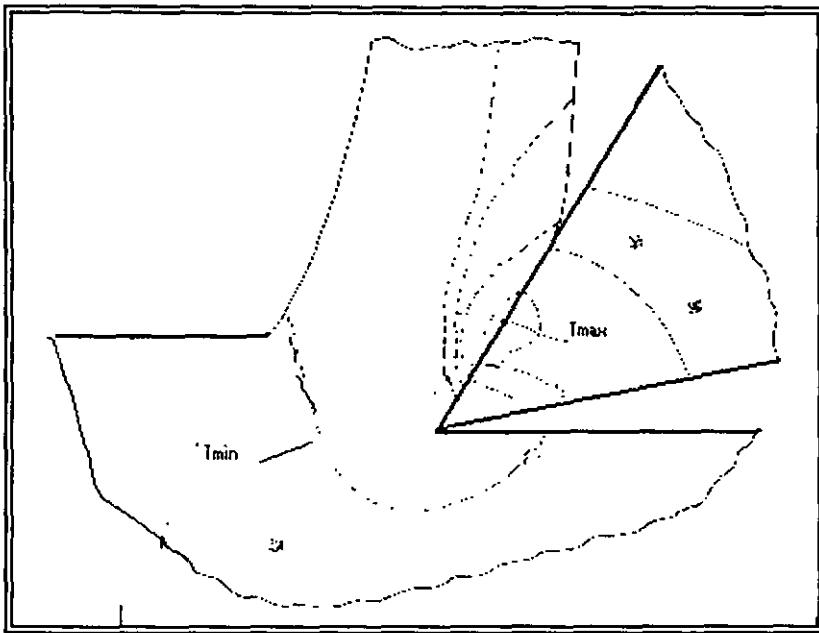


Figura 4.6. Distribución de la temperatura en las herramientas de corte.<sup>7</sup>

#### 4.3. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN LAS HERRAMIENTAS DE CORTE

Las empresas dedicadas a la fabricación de herramientas efectúan constantemente estudios para mejorar las herramientas y entender mejor el desgaste de las mismas. Un área que concierne a estos

estudios ha sido identificada como mecanismos de desgaste de las herramientas. Los mecanismos de desgaste particulares dependen sobre todo de los esfuerzos de contacto, la velocidad relativa en la interfase de desgaste, la temperatura y las propiedades físicas de los materiales en contacto. Para un conjunto en particular de materiales en contacto, los diagramas de los mecanismos de desgaste han sido empleados para identificar los rangos de presión normal y la velocidad que resulta en un mecanismo de desgaste en particular. La figura 4.7. muestra la estructura general de los diagramas cuando el área de las superficies en contacto permanecen constantes. La temperatura no está graficada como variable; sin embargo, esta es una variable que es dependiente de la presión (esfuerzo normal), la velocidad y el tamaño de la superficie de desgaste. Las cuatro clases de zonas de los mecanismos de desgaste son:

- Zona de desgaste fuerte
- Zona de desgaste por fundición
- Zona de desgaste denominada de oxidación y difusión
- Zona de desgaste denominada plástica.

Las investigaciones sobre los desgastes de las herramientas de corte han establecido un diagrama similar para el avance, el cual está relacionado con la presión para una ciertas condiciones dadas. La línea punteada en la figura 4.6, muestra algunas posibles fronteras que pueden ser usadas para definir la zona de operación segura de maquinado. El montaje de los dos diagramas proporciona las bases para discutir el desgaste abrasivo y las condiciones de falla de las herramientas.

**Mecanismos de desgaste inicial.** Los dos materiales en contacto tienen una superficie irregular rugosa en forma de protuberancias o asperezas. Las asperezas de los dos materiales en contacto crean unas diminutas áreas de contacto. El área total es una parte del área proyectada de la superficie de contacto. Los esfuerzos y el calor se intensifican por la aspereza y la parte removida ocurre debido al fuerte desgaste provocado por la fractura de estas zonas o la fundición de esas partículas. Conforme esas partículas son removidas, la rugosidad de la superficie inicial es alterada y el área de contacto se incrementa. Si las condiciones de la fuerza permanecen inalterables, el decremento de la presión y el aumento del mecanismo de desgaste activo cambia por un desgaste debido a la plasticidad y/o el desgaste denominado por oxidación y difusión. Este periodo inicial de desgaste forma pequeñas formas visibles de desgaste de la superficie.

**Mecanismo de estado estable del desgaste.** Con ciertas condiciones de velocidad y esfuerzos normales podrían continuar hasta causar un fuerte desgaste o la fundición de la pieza, esto podría causar la falla total de la herramientas de corte. Suponiendo que tales condiciones no existen, la superficie

---

<sup>7</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 39, volumen 16

desgastada crecería progresivamente. Si las superficies de desgaste son denominadas zonas plásticas, pequeñas partículas del material son mecánicamente deformadas y fracturadas a lo largo de la superficie de desgaste. Generalmente se le denomina a este mecanismo desgaste por abrasión, esté es el proceso de desgaste más común a lo largo de la superficie de salida de la mayoría de las herramientas.

Como se mencionó, los esfuerzos normales y la variación de la temperatura sobre la superficie de desgaste, así como los mecanismos de plasticidad que son preponderantes en una zona de desgaste puede que no lo sean en otra. La figura 4.6. muestra que la máxima temperatura en la superficie de la herramienta ocurre en la superficie de incidencia a una pequeña distancia del eje de corte, en donde ocurren las condiciones de desgaste por cráter, con desgaste por difusión frecuentemente siendo el mecanismo dominante. La alta temperatura y presión causan un movimiento de los átomos de los materiales en contacto, y ese proceso de difusión localizado ayuda para retirar material de la herramienta y forma el cráter. En materiales de corte muy duros, tales como los cerámicos, en donde se emplean altas velocidades de corte, los mecanismos de difusión y oxidación son los principales responsables del desgaste.

La condición de ejes recocidos, los cuales se muestran en la figura 4.7 con línea punteada, afecta los procesos de dos maneras. Cerca del eje de corte, las altas presiones pueden causar que las partículas del material de trabajo se adhieran a la herramienta de corte. Si las fuerzas de corte debidas al movimiento de la viruta son lo bastante grandes, la unión sería temporal en el material hasta que se fractura la superficie de la herramienta. Cuando estas fracturas son pequeñas, el material de la herramienta puede ser retirado con el material previamente adherido. El segundo efecto se presenta cuando no se fractura por el movimiento de la viruta y permanece adherido, entonces se cambia la geometría de la herramienta.

El desgaste puede ocurrir como un astillamiento a lo largo de los ejes de corte. Tales astillamientos ocurren comúnmente cuando los ejes de corte están sujetos a cortes intermitentes. Esto resulta en impactos cíclicos y cargas térmicas en los ejes de corte. Estos dos estados de cargas cíclicas pueden iniciar pequeños rompimientos y entonces propagarse o crear otros rompimientos residuales para forma la astilla.

Los mecanismos de desgaste por difusión, abrasión, oxidación y astillamiento que se presentan con ciertas condiciones de corte en la zona segura de la herramienta se muestran en la figura 4.7 como causas del desgaste inicial de la superficie en cierto periodo de tiempo. El periodo de vida de la superficie es regularmente referido al periodo de desgaste de estado estable.

**Mecanismo último de desgaste.** El periodo de estado estable eventualmente aumenta la superficie de desgaste hasta un tamaño crítico que dispara los mecanismos de desgaste aceleradamente. Las herramientas con algún recubrimiento como en el caso de nitruro de titanio, sufre de un pequeño desgaste cuando esta capa se desgasta o se presentan pequeñas separaciones volumetricas del



recubrimiento, exponen el material base, que es de menor resistencia, resultando un acelerado desgaste de la herramienta. Las presiones y velocidades en esa superficie de desgaste comienzan a incrementar la temperatura, así que los mecanismos de oxidación y difusión y el fuerte desgaste localizado en la herramienta o las condiciones de fusión del material mostradas en la figura 4.7, causan una rápida destrucción de la herramienta. Un caso muy similar se presenta para los materiales suaves. El cambio de las herramientas debe ser realizado antes de que éstas lleguen a ese punto. La figura 4.8 muestra las tres zonas en términos de desgaste y tiempo.

Por último, el empleo de altos parámetros de corte acelera los mecanismos de desgaste. Pero por otro lado el diseño de nuevas máquinas y herramientas de corte han hecho posible el empleo de altas velocidades de corte, llegando a eliminar proporcionalmente mayores cantidades de energía térmica mediante la generación de viruta al reducir el tiempo de contacto entre la viruta y la herramienta. Las altas velocidades de corte incrementan la temperatura absoluta de la superficie de desgaste. Esto lleva a que en determinado momento el desgaste por abrasión es el de menor importancia y los procesos de desgaste por difusión y oxidación son los preponderantes en el desgaste a lo largo de la superficie principal de corte.

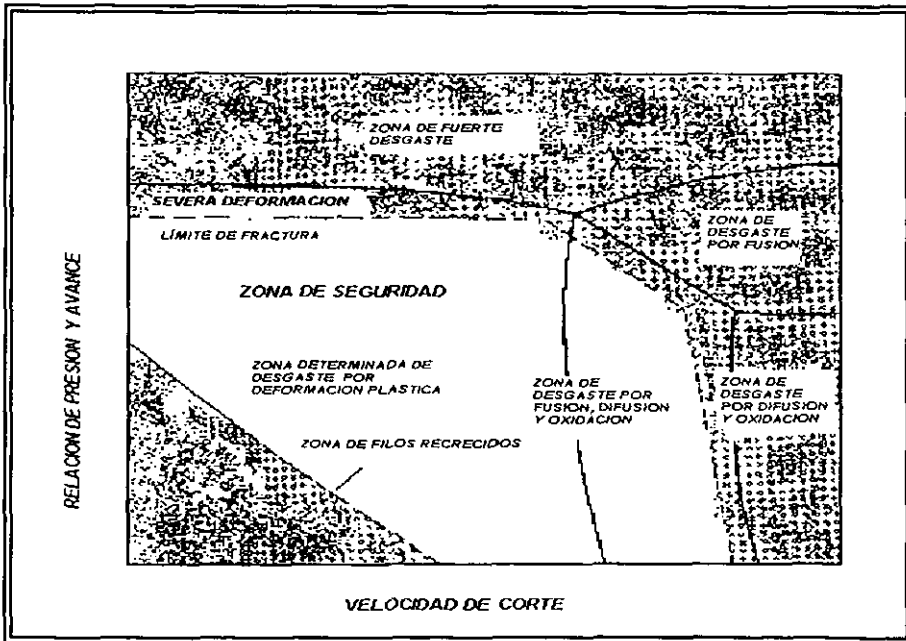


Figura 4.7 Diagrama de los mecanismos de desgaste y la región segura de operación para las herramientas de corte<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag.40, volumen 16

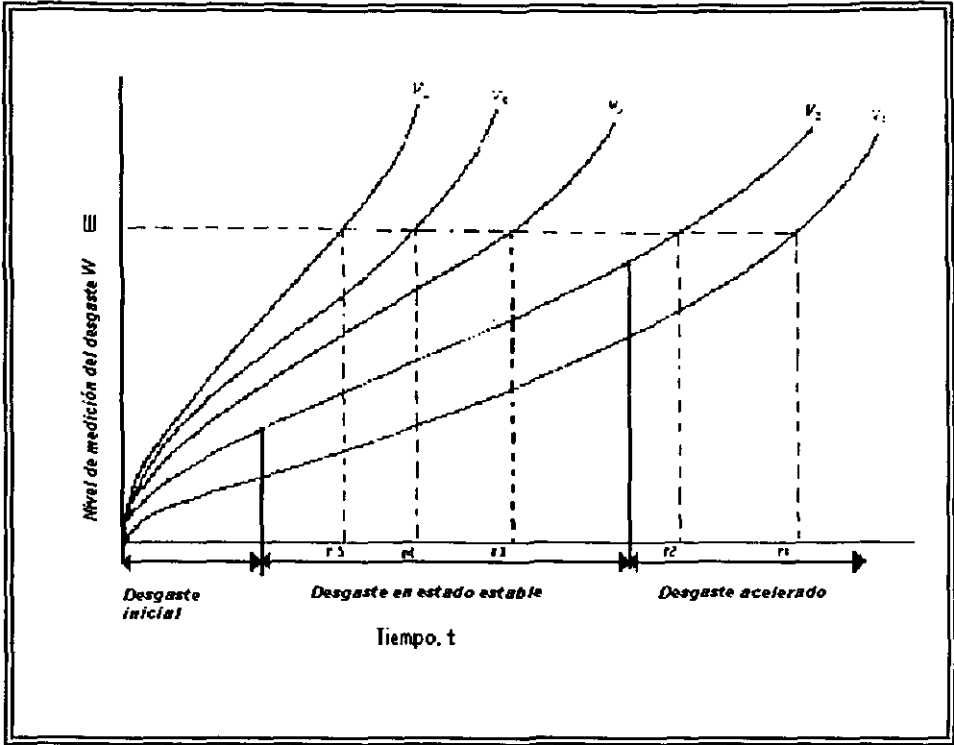


Figura 4.8 Curvas de desgaste para diferentes velocidades de corte.<sup>9</sup>

### 4.3.1. MANIFESTACIONES DEL DESGASTE EN LAS HERRAMIENTAS.

**Desgaste por destalonado y por cráteres.** El criterio normal para la duración de las herramientas es el desgaste por destalonado. Sin embargo el desgaste por cráteres, es causado principalmente por la abrasión de la viruta en la superficie de la herramienta. Un desgaste muy elevado produce superficies de menor calidad, aumenta las fuerzas de corte y puede provocar roturas de la herramienta. El desgaste de destalonado y por cráteres depende, en su dimensión, de la calidad de metal duro, de la velocidad de corte, del avance y de la duración del contacto del filo.

- **Fisuras en forma de peine** Las fisuras en forma de peine se producen por los cambios de temperatura a los que están sometidos los filos durante el maquinado. En un maquinado de gran

duración se presentan fisuras en forma de peine que pueden provocar desconchados en las aristas de corte. La formación de fisuras en los filos depende de la velocidad de corte, la calidad del metal duro, de la geometría de la herramienta y el avance.

- **Fisuras transversales.** Las fisuras transversales son fenómenos de fatiga en el material de corte. Principalmente se producen debido a los esfuerzos de impacto durante el maquinado. A este respecto, el tipo de contacto inicial del filo asume especial importancia.
- **Filos recrecidos** Los filos recrecidos se forman al confundirse el material a mecanizar y el material de corte del filo principal, deteriorando la calidad de la superficie de la pieza y reduciendo la duración de la herramienta. En la mayoría de los casos, se presentan en los bajos regímenes de velocidad de corte y dependen de la combinación del material de la pieza y del material de corte así como de la geometría de la herramienta.
- **Deformaciones plásticas.** Se presentan deformaciones plásticas si la resistencia del material de corte es disminuida por unas temperaturas de filos elevadas de tal forma que las fuerzas de corte provocan la deformación de los filos.

#### 4.4. ANÁLISIS DEL DESGASTE

Las herramientas de corte que ya no cumplen con las tolerancias geométricas en la pieza, se considera que su vida útil ha terminado. Sin embargo las herramientas pueden ser reafiladas y reutilizadas como en el caso de brocas, insertos de diamante, cortadores de carburo, etc. permitiendo obtener mejor provecho de estas herramientas.

##### 4.4.1 CRITERIOS DE FALLA.

La vida útil de la herramienta entre el reafilado o el reemplazo puede ser especificada de numerosas maneras, como:

- a) Tiempo real de corte hasta la falla
- b) Tiempo total de corte hasta la falla (para el caso de procesos de corte interrumpidos como es el caso del fresado de superficies o barrenados profundos).
- c) Longitud total de corte hasta la falla.
- d) Volumen de metal retirado hasta la falla
- e) Número de piezas producidas hasta la falla
- f) Parámetros de corte empleados hasta que se presenta la falla.

---

<sup>9</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 41, volumen 16

Cada uno de esos métodos fue encontrando algunas aplicaciones en determinado momento. Aunque todos estos métodos son relativos, actualmente son utilizados para determinar el criterio de falla de las herramientas. Una herramienta se dice que falla cuando no logra realizar su función, así que el criterio de falla podría depender de los requerimientos de las piezas que se están maquinando. En una operación de rugosidad el acabado superficial o tolerancia dimensional podría ser poco importante mientras un incremento excesivo de la fuerza de corte y la potencia requerida puede ser tomada como un criterio de falla. En operaciones de acabado, las tolerancias geométricas de la superficie pueden ser las de mayor importancia y las herramientas pueden fallar cuando las condiciones especificadas no se obtienen. Con herramientas de forma, la exactitud dimensional es crucial y solamente se limita al cambio cuando se sustituye la herramienta. Todas estas fallas están relacionadas principalmente a los diferentes desgastes que sufren las herramientas.

Rara vez una herramienta es empleada hasta que falla cuando realiza operaciones de fresado o barrenado en donde se involucra la rugosidad, aunque esto se evita usualmente, ya que esto ocasiona daños a las piezas y en determinado momento origina el perder totalmente la herramienta. Es por eso que es conveniente quitar la pieza justamente antes de una falla completa. Una falla completa (o destrucción total) puede ser causada por las altas fuerzas de corte debidas a cargas intermitentes, las cuales producen una fractura extendiéndose desde la superficie de incidencia hasta la superficie de desahogo. Esta situación se agrava con la formación de viruta discontinua, condiciones de cortes interrumpidos, formación de cráter o desgaste, y un mal diseño de la herramienta. La falla completa también se puede presentar por una excesiva temperatura de corte, la cual suaviza el material de la herramienta en la región de corte y permite que fluya plásticamente bajo la acción de las fuerzas de corte. Otro tipo de falla se refieren como "fallas preliminares", estas también son importantes. En este tipo de fallas, los ejes de corte son astillados, o poseen grietas muy finas debido principalmente a las cargas fluctuantes tanto térmicas como mecánicas. Estas fallas pueden acentuar el proceso de desgaste y provocar la destrucción total de la herramienta.

En todo esto que se ha visto hasta el momento, las fallas de las herramientas están relacionadas con su desgaste y las condiciones de acabado de las piezas de trabajo, es por ello que varios criterios de fallas se han utilizado para determinar la vida de las herramientas.

#### **4.4.2. FORMAS DE DESGASTE EN LAS HERRAMIENTAS Y LA ACCIÓN CORRECTIVA EN EL MAQUINADO DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.**

A continuación se enlistan las formas de falla de las herramientas más comunes que se presentan durante el maquinado de aluminio y sus aleaciones:

## CAPÍTULO IV. DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL MAQUINADO DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

- a) Desconchados en las aristas de corte (cargas térmicas).** Esta falla se presenta regularmente cuando existe variación en la temperatura durante el corte, por lo regular se muestra como grietas perpendiculares al eje de corte. Se recomienda:
- Utilizar metal mas duro y tenaz
  - Disminuir el avance por diente
  - Aumentar la velocidad de corte
  - Seleccionar ángulos de corte positivos
  - Emplear una gran cantidad de soluble o eliminarlo. No debe emplearse intermitentemente.
- b) Desconchados o astillado en las aristas de corte (carga mecánica).** Esta falla se presenta debido a la variación de las fuerzas de corte, ocasionando especialmente fluctuaciones en los esfuerzos de corte, dando como resultado una fractura a lo largo del eje de corte de la herramienta. Para evitar esta falla se recomienda:
- Utilizar metal duro más tenaz
  - Incrementar la velocidad de corte
  - Seleccionar ángulos de corte negativos (bisel de estabilización)
  - Comprobar la rigidez de la máquina, de la herramienta así como del sistema de sujeción.
  - Disminuir el avance por diente
  - Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
  - Incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco
  - Reducir el ángulo de salida o de alivio de la herramienta
  - Reducir la profundidad de corte
- c) Rotura del inserto.** Esta falla se presenta cuando se emplean parámetros de corte excesivos y el material de trabajo es muy duro y la herramienta no es lo suficientemente fuerte para resistir las fuerzas de corte. Para evitar esto se recomienda:
- Procurar que no se obstruya la evacuación de las rebabas
  - Utilizar metal duro más tenaz
  - Reducir la velocidad de corte
  - Reducir el avance por diente
  - Reducir la profundidad de corte
  - Emplear herramientas con ángulos de corte mas robustos
  - Emplear ángulos negativos mas robustos
  - Emplear insertos cuadrados o redondos
  - Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
- d) Desgaste considerable por destalonado.** Este desgaste se presenta regularmente en los biseles de la herramienta. Para ello se recomienda:
- Emplear metal duro mas resistente al desgaste
  - Aumentar el avance por diente

#### CAPÍTULO IV DESGASTE DE LAS HERRAMIENTAS DE CORTE EN EL MAQUINADO DE ALUMINIO Y SUS ALEACIONES

**e) Desgaste considerable por cráteres.** Este desgaste se presenta debido principalmente a la erosión que ocasiona la rebaba al pasar sobre la superficie de la herramienta. Para disminuir este desgaste se recomienda:

- Disminuir la velocidad de corte
- Disminuir el avance por diente
- Emplear soluble con buenas propiedades de lubricación
- Emplear ángulo de corte positivos

**f) Formación de filos recrecidos.** Esta falla se presenta directamente en el filo de la herramienta y es ocasionada debido a que el material de trabajo se funde en la punta de la herramienta. Para evitar esta falla se recomienda:

- Aumentar la velocidad de corte y/o avance
- Emplear otra calidad de metal duro
- Utilizar filos rectificadas y ángulos de corte positivos

**g) Desgaste prematuro.** Esta falla se presenta cuando las condiciones de corte no son las ideales para el material que se está trabajando. Para ello se recomienda:

- Seleccionar correctamente el grado de dureza de la herramienta:
  - Emplear metal mas duro con mayor resistencia al desgaste.
    - Emplear herramientas recubiertas
    - Emplear herramientas cerámicas
- Incrementar el flujo del refrigerante
- Incrementar el radio de la herramienta
- Disminuir la velocidad de corte
- Incrementar el avance por diente
- Incrementar el ángulo de salida o de alivio
- Reducir la vibración de la máquina
- Verificar cambios de dureza en el material.
- Verificar que la altura de la punta de la herramienta esté sobre el centro.
- Incrementar la profundidad de corte

**h) Ejes de corte con fisuras.** Esta falla se presenta regularmente porque la herramienta empleada no es la correcta para el tipo de material que se esta empleando. Para ello se recomienda:

- Emplear herramientas con buen grado de dureza
- Preparar bien los filos de corte con un incremento en los filos
- Que la geometría de la herramienta emplea un ángulo de incidencia negativo.
- Incrementar la velocidad del husillo
- Reducir el avance
- Verificar la rigidez de la pieza y de la máquina
- Verificar la deflexión de la herramienta incrementando el diámetro del zanco y reduciendo la longitud

del zanco.

- Decrementar el ángulo de alivio.
- Verificar que el centro de corte de la herramienta no se encuentre por arriba.
- Reducir la profundidad de corte.

i) **Deformación del filo de corte.** Esta falla la ocasiona la mala selección del material de la herramienta de corte para el material de trabajo. Para ello se recomienda:

- Emplear herramientas con un mayor grado de dureza para aumentar la resistencia al desgaste.
- Incrementar el flujo de soluble
- Reducir la velocidad de corte
- Reducir el avance
- Reducir la profundidad de corte

#### 4.4.3.1. MODELOS DE DESGASTE DE HERRAMIENTAS

Uno de los instrumentos científicos mas empleados por los fabricantes de herramientas para determinar la vida de las mismas fue el realizados por FW. Taylor<sup>10</sup>. En el modelo explícito en la ecuación 4.1, se hace notar la dependencia del tiempo de duración de la herramienta y la velocidad de corte. Taylor desarrolló la ecuación 4.1 mediante un extenso de número de experimentos relacionados con la velocidad para determinar la vida de las herramientas:

$$V t^n = C \quad 4.1$$

Este modelo se conoce como la ecuación de Taylor de la vida de las herramientas, en donde el tiempo de vida de la herramienta  $t$ , está relacionado con la velocidad de corte  $V$ , por medio de las constantes  $n$  y  $C$ . Estas constantes fueron obtenidas a base de pruebas con diferentes herramientas de corte empleando distintas velocidades y un "criterio de vida de herramientas" para establecer los puntos en los cuales la vida útil de la herramienta de corte llegaba a su fin. La figura 4.8. muestras las curvas típicas de desgaste para diferentes velocidades de corte. El límite de desgaste o criterio de falla  $W$ , muestras que el tiempo transcurrido antes del reemplazo de la herramienta se incrementó con un decremento de la velocidad de corte. El modelo relacional de Taylor se muestra en la figura 4.9., ha sido ampliamente empleado en la industria en forma modificada para las condiciones actuales. De hecho, la constante  $C$  que iguala la velocidad de corte para 1 minuto de tiempo transcurrido antes de que se llegue al límite de desgaste de la herramienta, ha sido ampliamente usada para medir la maquinabilidad para cualquier material en específico empleando herramientas de corte particulares con condiciones de corte específicas. Las condiciones de corte se consideran normalmente, el avance y la profundidad de corte. La tabla 4.2, contiene otros modelos para determinar la vida de las herramientas que se adiciona el avance y/o la profundidad de corte como

<sup>10</sup> Taylor F.W. " On Art of Cutting Tools " Trans ASME Vol 28, 1907

variables que influyen en la vida de las herramientas.

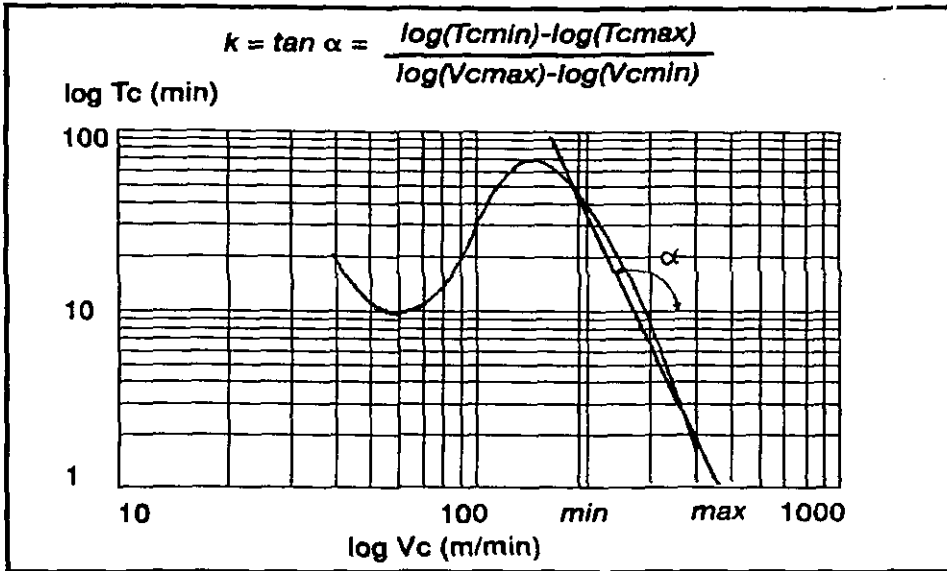


Figura 4.9. Diagrama V-t, curva característica de la velocidad de corte y tiempo.<sup>11</sup>

CRITERIO	MODELO
Modelo linealizado de Taylor	$\ln t = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$
Modelo linealizado de Taylor con términos de iteración	$\ln t = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$
Modelo parcial de segundo orden	$\ln t = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$
Modelo completo de segundo orden.	$\ln t = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$
Modelo de König y DePiereux *	$\ln t = b_0 + b_1V + b_2f$

Tabla 4.2. Modelos propuestos par determinar la vida de las herramientas<sup>12</sup>

donde :

**t** es la vida de las herramienta. **x** es **ln V**, donde **V** es la velocidad de corte, **x2** es **ln f**, donde **f** es el avance, **x3** es **ln D**, donde **D** es la profundidad de corte, **b0, b1, b2, ...b33** son coeficientes determinados experimentalmente.

El limite del desgaste o criterio de falla es una importante decisión para tomarse en cuenta en el

<sup>11</sup> Catálogo de información técnica "Cementahandbuch" pag. 82



desarrollo de los modelos de vida de las herramientas. Las características y tamaños del desgaste de una superficie con un desgaste particular son frecuentemente empleadas. La figura 4.10. muestra la variedad de desgastes y fracturas superficiales que pueden presentarse o falla de la herramienta. Esta figura también muestra como se mide la cantidad de desgaste en una o más de esas superficies desgastadas. La utilización de estos límites de desgaste y las pruebas de vida de herramientas puede ser obtenido empleando instrumentos ópticos.

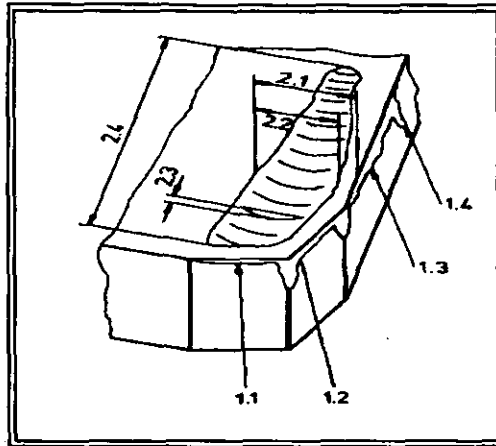


Figura 4.10. Muestra las zonas más importantes que se pueden medir mediante un instrumento óptico<sup>12</sup>

En la figura 4.10 podemos apreciar los tipos de desgaste y la técnica de inspección de la zona desgastada:

**1. Desgaste por destalonado**

- 1.1 Bisel de la arista o filo secundario
- 1.2 Bisel de arista o filo principal
- 1.3 Filo principal (sector medio de la profundidad de corte)
- 1.4 Punto final del filo de corte

**2. Desgaste por cráter**

- 2.1 Ancho del cráter hasta el filo de corte
- 2.2 Ancho del cráter
- 2.3 Profundidad del cráter

<sup>12</sup> Metals Handbook "Desgaste y vida de herramientas" pag 42, volumen 16

<sup>13</sup> Catálogo de información técnica "Condiciones de corte" pag. 25

#### 2.4 Longitud del cráter

Dentro de los procesos de maquinado podemos mencionar que el proceso de fresado es el de mayor importancia y mediante el cual se definen la mecánica del corte de materiales. Es por ello que los fenómenos típicos de desgaste en el fresado son: el desgaste por destalonado y por cráter, fisuras en forma de peine, desconchados y descantillados, fisuras transversales, filos recrecidos y deformaciones plásticas.

## **Capítulo V**

### **EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

#### **5.1.INTRODUCCIÓN.**

En este capítulo se analizan y estudian algunas de las problemáticas más frecuentes que se presentan durante el maquinado de aluminio y sus aleaciones, examinando las causas que los provocan y planteando una serie de alternativas viables de solución. En el primer capítulo se mencionó que existen variables tanto independientes como dependientes que provocan la inestabilidad en los procesos de maquinado (concentración de soluble, presión de sujeción de la pieza en el dispositivo, parámetros de corte, y otras), las cuales ocasionan que cada proceso tenga su propio planteamiento de solución. Estos hechos llegan a ser tan particulares que en procesos similares que emplean máquinas de la misma marca con las mismas características técnicas, dispositivos de maquinado iguales, herramientas de corte idénticas, procesos de maquinado semejantes y utilizando piezas del mismo lote de fundición, se presentan una serie de diferencias que en ocasiones influyen drásticamente en los procesos de maquinado, variando radicalmente los parámetros de proceso tales como los parámetros de corte, las concentraciones de soluble, la geometría de las herramientas de corte, etc.

#### **5.2. EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS MAS RELEVANTES EN EL MAQUINADO DEL ALUMINIO Y SUS ALEACIONES.**

En los procesos de maquinado de aleaciones de aluminio con bajo contenido de silicio, se presentan una cantidad de factores que influyen en la calidad del producto, esto se traduce en problemas como el desgaste prematuro de las herramientas, inadecuado aprovechamiento del soluble de corte, así como problemas en el control de las tolerancias geométricas especificadas en los planos tales como la planicidad, perpendicularidad, concentricidad, posición de barrenos, etc. En este trabajo se presentan tres estudios de los problemas más comunes en el maquinado de piezas de aleaciones de aluminio con bajo contenido de silicio. En el primer experimento se analiza la variación de la planicidad de una brida de un múltiple de

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

admisión que ensambla al motor, ya que dentro de todas la gama de tolerancias geométricas ésta es de suma importancia para evitar fuga de gasolina, baja potencia en el motor y otras fallas inherentes a una planicidad fuera de especificación. En el segundo experimento se analizan dos diferentes solubles de corte enfocándose al control diametral en dos barrenos rimados de un reten sello de aceite que se emplean como registros para alinearse al motor. En el tercer y último experimento se analiza la duración de las herramientas de corte y como influye la concentración del soluble en la vida útil de las herramientas, siendo ésta una consecuencia inherente en la calidad de la pieza.

### **5.3. ESTUDIO I. TOLERANCIAS GEOMETRICAS - PLANICIDAD**

La planicidad es una de las tolerancias geométricas de mayor importancia en los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones y como tal, es difícil de controlar, por lo que es necesario verificar una serie de circunstancias tanto físicas (la estructura de la pieza, robustez de la pieza, etc.) como de proceso (tipo de sujeción, presión de sujeción, etc.) y en una infinidad de ocasiones, se dificulta mantenerla bajo cierto rango especificado en el plano de fabricación. En este estudio se muestran y se analizan los gráficos de planicidad de la brida de ensamble de un múltiple de admisión como un patrón de estos aspectos. Para ejemplificar mejor el estudio de planicidad, se realizan los gráficos en tres dimensiones de la brida maquinada en dos diferentes máquinas que fabrican la misma pieza y en donde se puede apreciar algunas diferencias relevantes.

Para cumplir el objetivo de esta sección, el estudio se fundamenta dos aspectos:

- Los parámetros de corte empleados en el fresado de la superficie.
- Las modificaciones externas que se requieren realizar en los dispositivos de maquinado y en los procesos de corte para cumplir con esta tolerancia geométrica.

#### **5.3.1. DESARROLLO**

Dentro de toda la gama de posibilidades que existen para analizar las tolerancias geométricas en los procesos de maquinado, se seleccionó el caso de la planicidad como una de las características más difíciles mantener bajo las especificaciones marcadas en los planos de fabricación debido a que el aluminio presenta en algunas ocasiones problemas de deformación al momento de sujetarse, liberación de esfuerzos internos producidos durante el proceso de fundición y granallado y las fuerzas de corte presentes durante el fresado de las superficies.

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Para este análisis se seleccionó la brida de ensamble de un múltiple de admisión de aire, el cual presenta serios problemas para controlar la planicidad, para ello el estudio de esta característica se realizó de la siguiente manera:

- Se selecciona la brida de ensamble al motor del múltiple de admisión que tiene una tolerancia de planicidad crítica de 0.10 mm en una área aproximada de 300 mm de largo y 70 mm de ancho.
- Se seleccionan dos Centros de Maquinado de CNC del mismo modelo y de la misma marca, con las siguientes características técnicas: velocidad en los ejes X, Y y Z de 40 m/min., aceleración en los tres ejes de 4.5 m/s<sup>2</sup>, 10,500 revoluciones del husillo, bomba con soluble de 20 bars y adaptador de las herramientas SK40 norma DIN 69871. La figura 5.1. muestra la máquina empleada para efectuar los estudios.
- Se selecciona un cortador de diámetro 80 mm con 5 insertos con punta de diamante para efectuar el proceso de maquinado de la superficie de ensamble al motor, porque la brida tiene un ancho de 70 mm.



La figura 5.1. Muestra la máquina de CNC marca Chiron, en la cual se maquina el múltiple de admisión

- El maquinado de la pieza se hace en dos pasos, mediante un precorte y un acabado, estandarizando los parámetros de corte en las dos máquinas:

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- a) *Precorte*. Se realiza un precorte en el cual se retira aproximadamente 2 mm de profundidad de corte con una velocidad de corte de 4000 m/min. y un avance por inserto de 0.12 mm/rev.
- b) *Acabado*. Se realiza el acabado de la superficie, en el cual se retiran 0.2 mm de profundidad de corte con una velocidad de corte 4000 m/min. y un avance por inserto de 0.05 mm/rev.
- Se maquinan cinco piezas seguidas en cada máquina.
- Se mide la planicidad de cada una de las piezas, en una máquina de medición por coordenadas mediante el proceso de barrido de la superficie con un palpador esférico. La máquina tiene las siguientes características técnicas: una máquina de medición de control numérico, con una mesa de trabajo de 1500 mm en el eje X, 900 mm en el eje Y e 700 mm en el eje Z, velocidad máxima de 305 mm/s y una aceleración de 2400 mm<sup>2</sup>/seg., rango de temperatura óptimo para su funcionamiento ideal de 18 a 22 °C, repetibilidad de una medición a otra de 2 μm, un error en el proceso de barrido de la superficie de 2 μm y cabezal adaptador para colocar el palpador esférico, este palpador es de rubí con un diámetro de 3 mm. Como se muestra en la figura 5.2
- Se analizan las diferencias y las posibles causas que provocan estas diferencias.



La figura 5.2. Muestra una máquina de Medición por Coordenadas Marca ZEISS

En función de lo anterior, se pueden agrupar los aspectos que afectan a la planicidad en dos grupos:

### Consideraciones técnicas:

- Depende del área a fresar y de la estructura física de la pieza
- La tolerancia total de planicidad indicada en los planos de fabricación de la pieza.

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- En función de la tolerancia de planicidad especificada en el plano, se define el número de pasadas que el cortador frezará la superficie.

### **Consideraciones de proceso:**

- La geometría del cortador y el número de insertos a emplear
- El tipo de sujeción de la pieza (hidráulico o neumático)
- La forma de sujeción de la pieza
- Deformación de la pieza al ser sujeta.

De las consideraciones anteriormente señaladas, las más difíciles de controlar son las de proceso, ya que en la mayoría de los casos, no son fáciles de determinar. Existen una serie de factores implícitos en el proceso de maquinado, los cuales impiden que se controle la tolerancia de planicidad. Entre otras se puede mencionar: la inapropiada ruta de corte, la falta de un precorte y posteriormente de un acabado, las fuerzas de corte presentes durante el fresado, las cuales, en conjunto con la sujeción de la pieza provoca deformaciones o zonas vibradas sin una razón lógica aparente, asimismo la pieza se deforma al ser presionado por el pisador cuando está desalineado con el apoyo en dirección de la fuerza de sujeción ocasionando deformaciones en la pieza y por último, que la pieza no está sujeta con la presión adecuada, provocando un ligero movimiento durante el maquinado debido básicamente a las fuerzas generadas durante el corte o en su contraparte, la alta presión provoca grandes deformaciones al no existir colinealidad entre el apoyo y el pisador.

A continuación se muestran la brida de ensamble al motor de un múltiple de admisión, en donde la planicidad especificada en el plano es de 0.1 mm y en la cual se indica mediante flechas el punto de aplicación de la fuerza y los puntos de apoyo mostrando a simple vista la posibilidad de flexionarse al momento de sujetar de la pieza, como se indica en la figura 5.3.

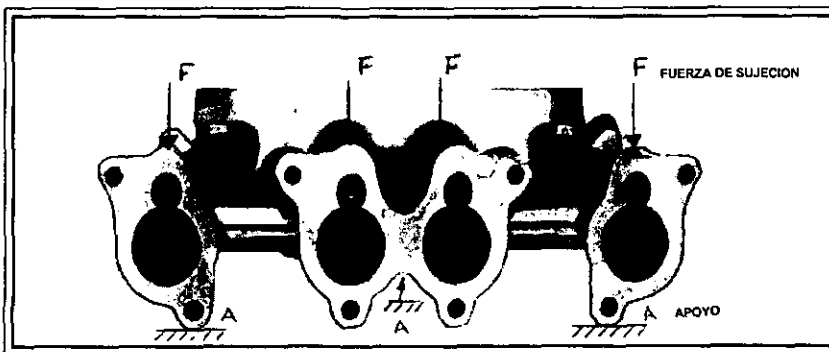


Figura 5.3. Brida de ensamble al motor de un múltiple de admisión

**5.3.2. RESULTADOS.**

A continuación se muestra en la tabla 5.1 un resumen comparativo de la planicidad de ambas máquinas en donde se aprecia una diferencia de aproximadamente el 30 % de mejor planicidad en la máquina 1 con respecto a la máquina 2, adicionalmente se proporcionan las cinco gráficas de planicidad del múltiple de admisión de cada una de las máquinas, estas diferencias se fundamentan básicamente en las deformaciones presentes durante la sujeción, como se muestra en la figura 5.3., las fuerzas que se presentan al momento de sujetarla no son colineales entre el punto de aplicación del pisador y el apoyo. Esta es la causa principal del problema de planicidad a pesar de que en teoría las condiciones de corte y sujeción de la pieza son las mismas.

	Pza. 1 [mm]	Pza. 2 [mm]	Pza. 3 [mm]	Pza. 4 [mm]	Pza. 5 [mm]	Pza. 6 [mm]	Velocidad de corte [m/min]	Avance por filo [mm/rev]	Presión de sujeción [bar]
Máquina 1	0.060	0.053	0.048	0.063	0.039	0.045	4000	0.12	60
Máquina 2	0.061	0.052	0.084	0.095	0.076	0.082	4000	0.12	60

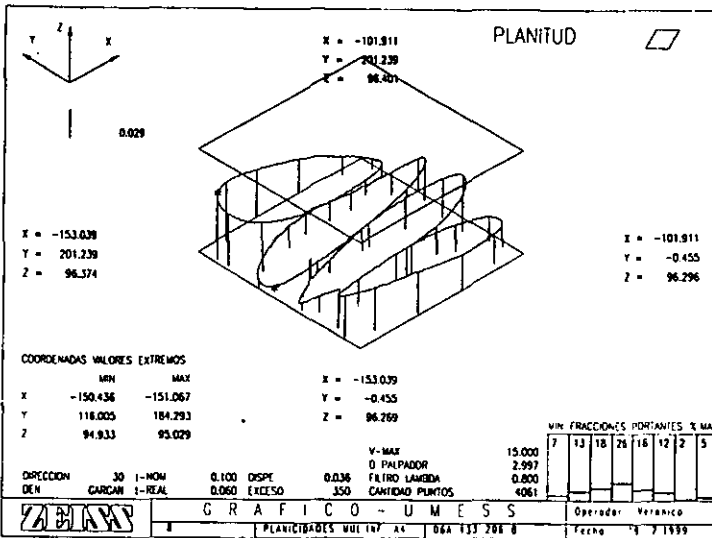
Tabla 5.1. cuadro comparativo de las dos máquinas.

Esto indica que en máquinas iguales con parámetros de corte y condiciones de operación similares, se tiene diferencias y esto es provocado por una serie de factores que en la realidad son difíciles de controlar, tales como los componentes físicos del proceso como son los dispositivos de sujeción, las piezas de fundición por gravedad, la fuerza que ejercen las herramientas de corte durante el proceso de corte, etcétera, así como los parámetros propios del proceso tales como la velocidad de corte, el avance, la concentración del soluble y otros.

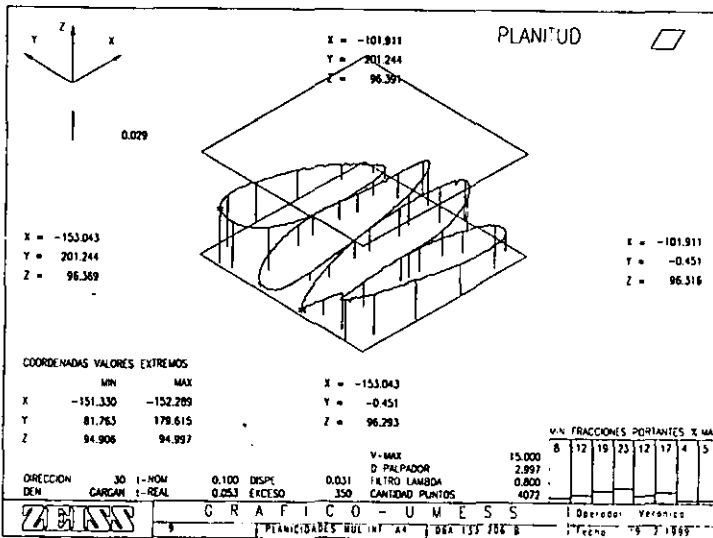


**CAPÍTULO V. EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

Máquina uno



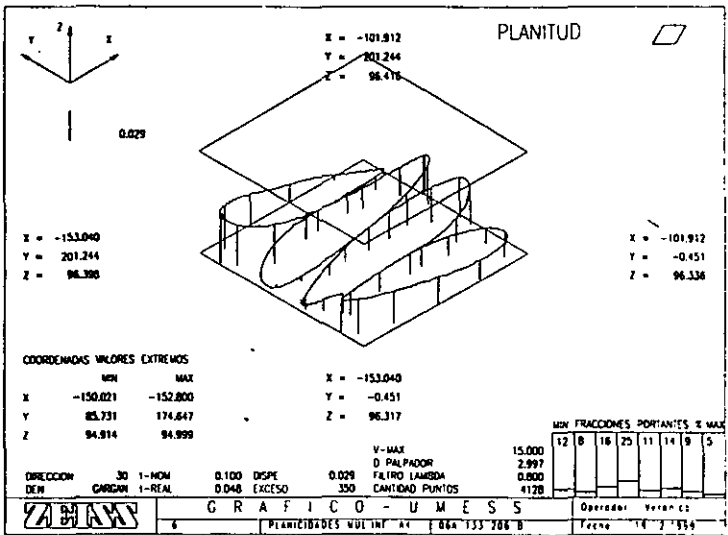
Gráfica 5.1. Planicidad de la pieza uno<sup>1</sup>



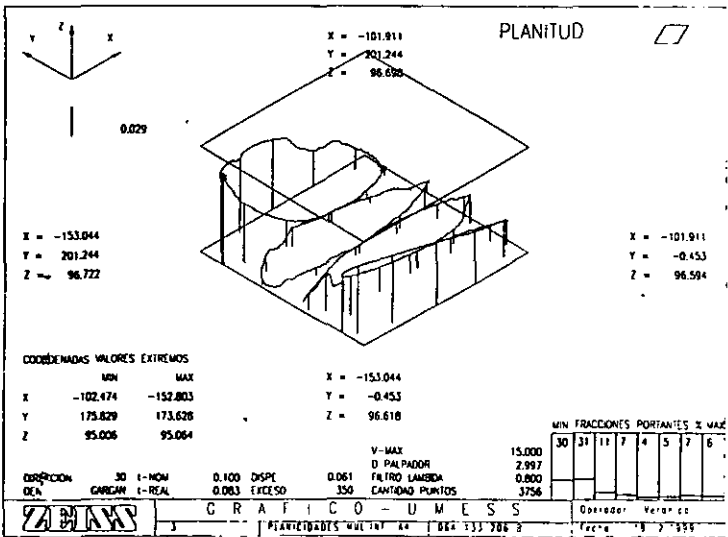
Gráfica 5.2. Planicidad de la pieza dos

<sup>1</sup> A son los puntos máximos y mínimos, B Son los tres puntos calculados como valor promedio de la pieza en referencia de la máquina, C es el porcentaje de la distribución de los puntos, D es información técnica del proceso: V-MAX velocidad máxima, D palpador es el diámetro del palpador, Filto lambda, es la eliminación de picos entre frontera y valle, cantidad de puntos son los puntos tocados por el palpador para evaluar la planicidad.

**CAPITULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

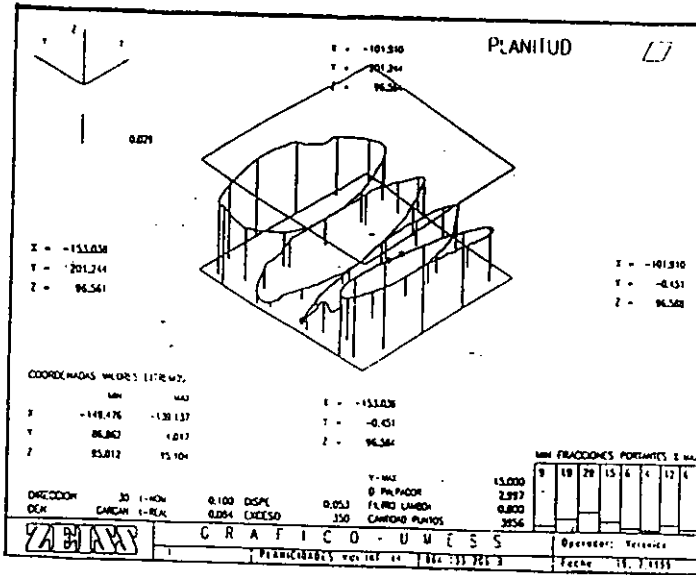


Gráfica 5.3. Planicidad de la pieza tres

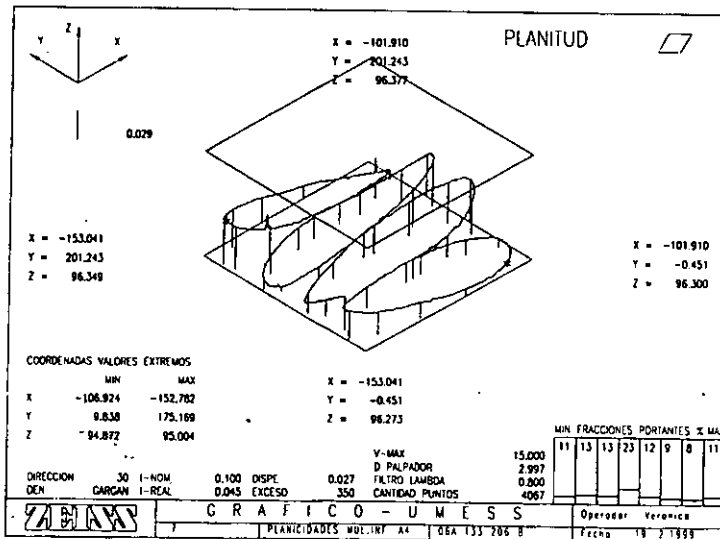


Gráfica 5.4. Planicidad de la pieza cuatro

CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS



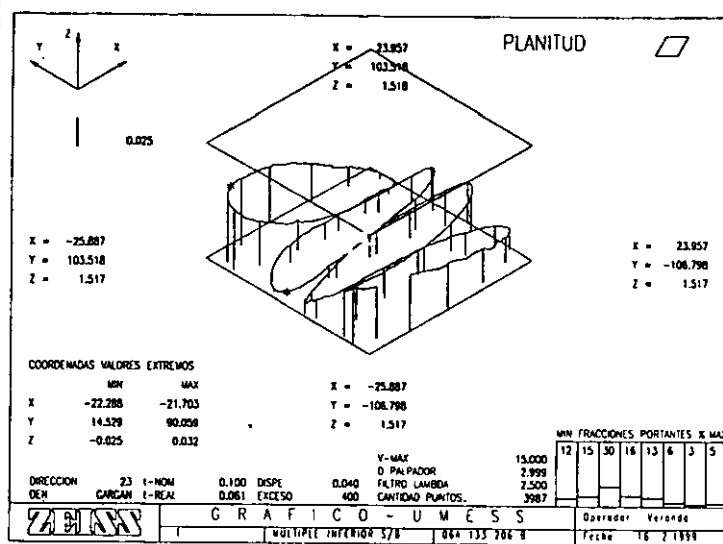
Gráfica 5.5. Planicidad de la pieza cinco



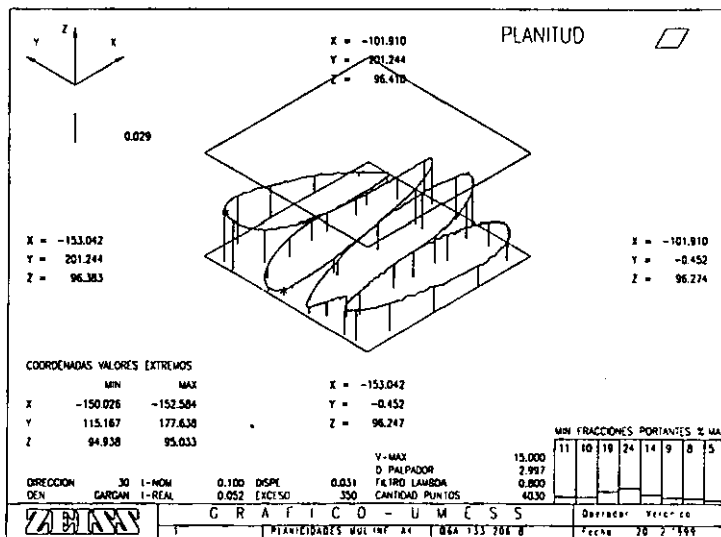
Gráfica 5.6. Planicidad de la pieza seis

# CAPÍTULO V EXPERIMENTACION. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Máquina dos

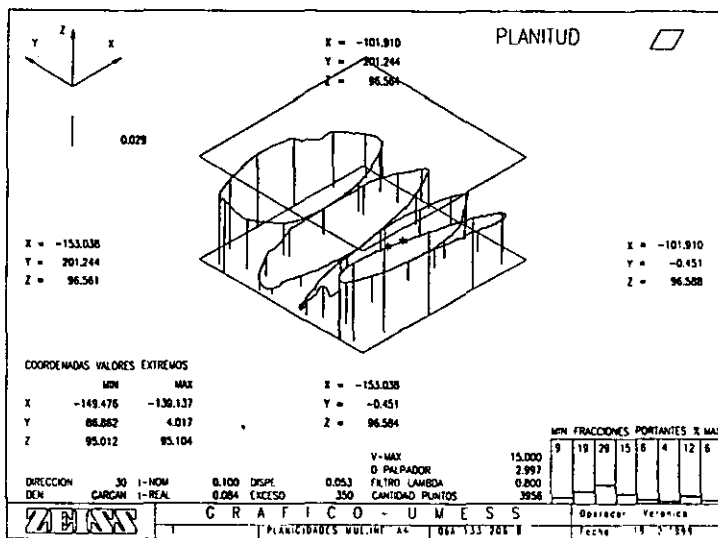


Gráfica 5.7. Planicidad de la pieza uno

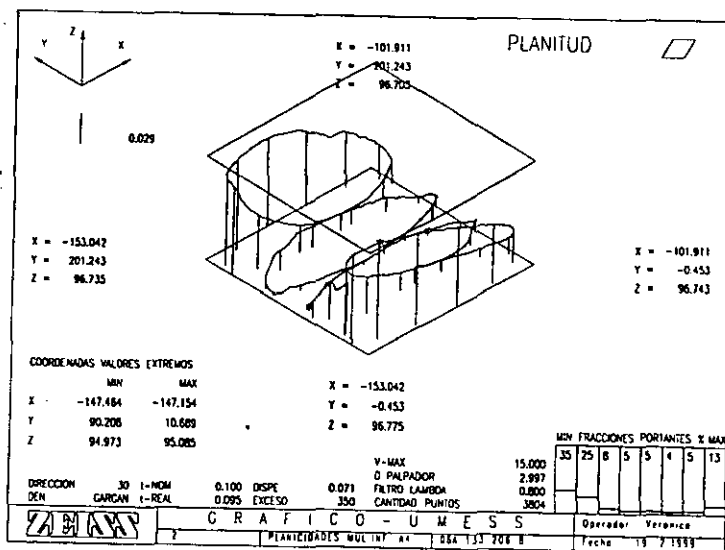


Gráfica 5.8. Planicidad de la pieza dos

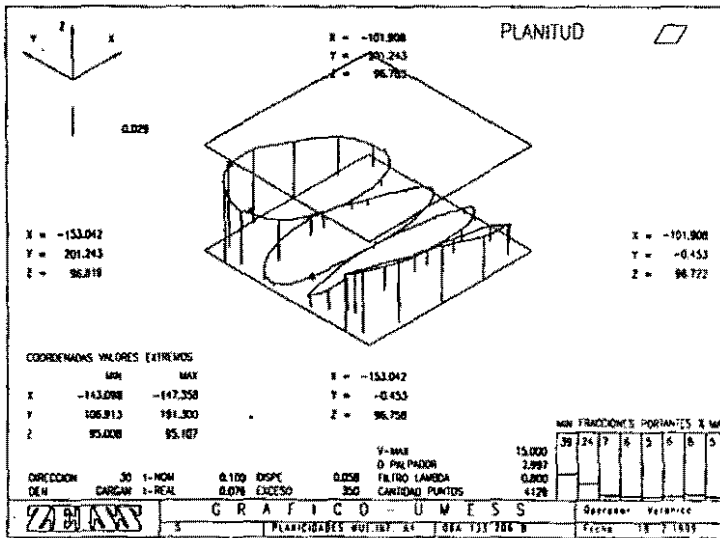
**CAPITULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**



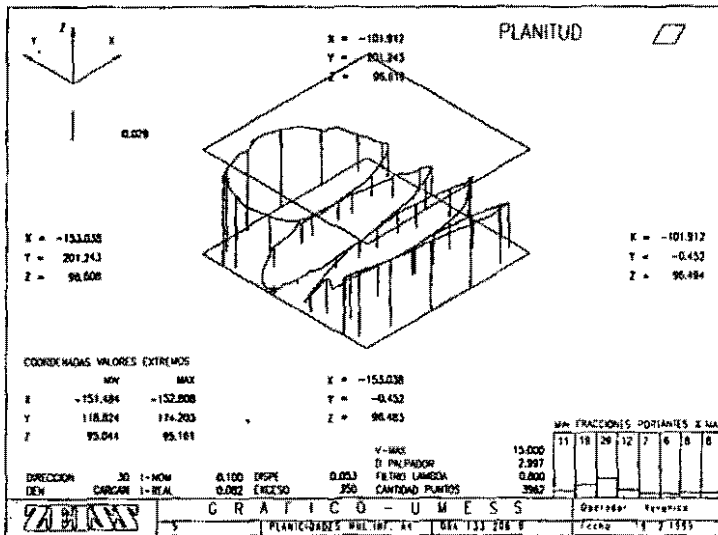
Gráfica 5.9. Planicidad de la pieza tres



Gráfica 5.10. Planicidad de la pieza cuatro



Gráfica 5.11. Planicidad de la pieza cinco



Gráfica 5.12. Planicidad de la pieza seis

## **5.4. ESTUDIO II: LA INFLUENCIA DEL SOLUBLE DE CORTE EN EL CONTROL DE LAS TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS.**

El soluble de corte dentro de los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones representa un importante factor en la disipación térmica y en la calidad de las piezas. Sin embargo, la mayoría de los ingenieros de manufactura cree que este agente solo es importante en el enfriamiento de las piezas durante el maquinado, dando un valor secundario a la concentración sin importar la gran influencia que este tiene sobre la calidad en el producto. En el siguiente trabajo experimental se evaluó el efecto de la concentración del soluble en la calidad de la pieza, específicamente en el control diametral de los barrenos que se utilizan como registro al motor de un retén sello de aceite.

Dentro de los procesos de maquinado de aluminio y sus aleaciones existen una serie de procesos que son afectados por la concentración del soluble tales como el formado, el mandrilado, el rimado, el fresado, etc. El propósito de este estudio es enfocarse al proceso de rimado, debido principalmente a que es uno de los procesos más críticos dentro del maquinado de aluminio y sus aleaciones.

En estos experimentos se tomó como medida base un barreno con tolerancia de 5 E8 (5.020 mm a 5.042 mm), por tanto, lo único que se reporta en las tablas son los valores en micrómetros de los diámetros de los barrenos rimados (por ejemplo: el valor de 33 es equivalente a 5.033 y así sucesivamente). Para ellos se realizaron los experimentos con dos diferentes solubles de distintos proveedores y se analizaron las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. La base de este experimento consiste en seleccionar un tipo de soluble y evaluar la influencia que tienen los aceites de corte para el acabado superficial y el control diametral de los barrenos de registro. (Por consideraciones de los fabricantes se reserva señalar los nombres de los fabricantes y refiriéndose a ellos como soluble A y soluble B).

El objetivo de este estudio es evaluar la influencia que tienen los aceites de corte en el control diametral de los barrenos rimados, ya que, éstos no tienen el mismo comportamiento con diferentes productos y/o piezas y con diferentes concentración de soluble (cantidad de aceite soluble en agua "emulsión"). En este caso las variables del proceso son el tipo de soluble y las concentraciones del mismo.

### **5.4.1. DESARROLLO.**

Este estudio se planteó y realizó de la siguiente manera:

- 1.- Se seleccionó un Centro de Maquinado de Control de CNC con las siguientes características técnicas: velocidad en los ejes X, Y y Z de 40 m/min., aceleración en los tres ejes de 4.5 m/s<sup>2</sup>, 10,500 revoluciones del husillo, bomba con soluble de 20 bars y

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- adaptador de las herramientas SK40 norma DIN 69871, para maquinar una pieza denominada reten sello de aceite, en donde se necesita controlar ciertas condiciones diametrales de los barrenos de registro al motor y no tener problemas de ensamble o fuga de aceite. Por tal motivo, es necesario mantener los parámetros de corte bajo un constante monitoreo y solo evaluar la influencia de la concentración del soluble de corte.
- 2.- Se consideran los dos barrenos del retén sello de aceite porque son los de alineación al motor y además las características a evaluar son muy cerradas y difíciles de controlar, para ello se seleccionan los barrenos rimados de diámetro 5 mm con tolerancia E8 (5.020 a 5.042). Como se muestra en la figura 5.4.
3. El proceso de corte se efectúa de la siguiente manera:
- Se realiza un precorte con una broca de carburo de tungsteno de tres filos con un diámetro de 4.8 mm, con una velocidad de corte de 170 m/min. y un avance de 0.21 mm/rev. Con los cuales se garantiza la estabilidad del proceso de precorte y de esta manera no se tendrán problemas posteriores al realizar el acabado del barreno.
  - Se efectúa el acabado con un escañador de carburo de tungsteno de diámetro 5 mm y 6 filos para de diámetro 5 con tolerancia E8 (5.020 mm a 5.042 mm), con una velocidad de corte de 60 m/min. Y un avance 0.07 mm/rev por inserto (0.42 mm/rev), para garantizar la estabilidad del proceso de maquinado.

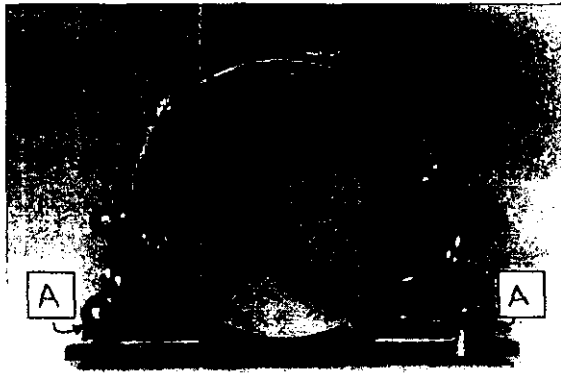


Figura 5.4. Reten sello de aceite, los barrenos rimados son los especificados con la letra A

4. Las condiciones generales del proceso son las siguientes:
- Una máquina en perfectas condiciones de operación, bien cimentada y alineada.
  - Herramientas de corte con la geometría de corte idónea para el maquinado de aluminio.



## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- Piezas de fundición del mismo lote y fecha en que se efectuó el vaciado.
  - Los efectos del calentamiento del soluble son despreciables.
  - La variación de la temperatura externa no afecta al diámetro en estudio.
  - La presión de sujeción de la pieza es siempre la misma.
5. El siguiente paso es colocar el soluble de corte A y proceder a tomar muestras de las piezas.
  6. Considerando lo anterior, se procede a verificar sistemáticamente el diámetro rimado cada cuatro horas de tres piezas maquinadas mediante una mesa de medición por coordenadas. La máquina tiene las siguientes características técnicas: una máquina de medición de control numérico, una mesa de trabajo de 1500 mm en el eje X, 900 mm en el eje Y e 700 mm en el eje Z, velocidad máxima de 305 mm/s y una aceleración de 2400 mm<sup>2</sup>/seg., rango de temperatura óptimo para su funcionamiento ideal de 18 a 22 °C, repetibilidad de una medición a otra de 2 μm, un error en el proceso de barrido de la superficie de 3 μm y cabezal adaptador para colocar el palpador esférico, este palpador es rubí, para garantizar tanto la redondez, dureza del material y repetibilidad durante el proceso de medición. Las tablas 5.2. y 5.3 se indican las medidas tomadas en campo.
  7. Una vez que se monitorea este soluble durante un mes, que es el tiempo suficiente para conocer y analizar cualquier efecto ajeno al estudio, se procede al cambio por el otro soluble.
  8. Se realizan los mismos chequeos con este soluble, tabla 5.3.

### **5.4.2. RESULTADOS.**

Los resultados después del estudio muestran inmediatamente que el soluble A permite controlar de manera más cerrada el rango de variación de la tolerancia geométrica del barreno rimado, con la ventaja de que este fluido no contiene cloro, fenoles y nitritos, pero con la desventaja de tener un olor más penetrante y poco agradable.

Los resultados indicados en el cuadro comparativo de la tabla 5.4, muestran que no existen grandes diferencias entre ambos solubles, sin embargo el control dimensional del barreno es mejor con el soluble A que con el B, esto se debe principalmente a los agentes refrigerantes y al momento de realizarse la emulsión o unión del aceite de corte y el agua, esto le permite al soluble A tener mejores propiedades de lubricidad que el soluble B.

**CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

Fecha	Concentración Soluble (%)	Piezas Fabricadas	Dimensión de los barrenos rimados (µm)					
			Pieza 1		Pieza 2		Pieza 3	
			1	2	1	2	1	2
17/10/96	8,5	95	35	35	36	36	36	35
17/10/96	8,0	93	35	35	34	35	36	35
18/10/96	9,5	342	32	33	33	32	33	33
19/10/96	7,5	399	32	32	32	33	32	32
20/10/96	8,5	344	32	33	33	32	32	32
20/10/96	9,0	64	32	32	31	32	31	32
21/10/96	10,5	384	31	32	31	32	32	32
24/10/96	11,5	1508	31	32	32	31	33	33
24/10/96	10,0	136	32	31	31	31	31	31
25/10/96	10,0	416	32	32	32	31	31	31
27/10/96	10,0	1419	33	33	33	33	33	33
28/10/96	9,5	832	33	33	33	33	35	35
28/10/96	9,5	196	34	31	33	33	32	32
31/10/96	9,0	1876	32	33	33	33	33	34
31/10/96	8,0	80	35	33	33	32	33	33
31/10/96	8,0	112	32	32	32	33	34	33
01/11/96	10,5	396	33	34	34	34	32	33
01/11/96	10,0	180	33	33	31	32	32	32
01/11/96	10,0	116	32	32	32	32	32	32
03/11/96	11,0	180	32	33	32	32	33	33
03/11/96	9,0	224	32	32	33	32	34	32
04/11/96	11,0	532	34	34	31	32	32	32

Tabla 5.2. Muestra el efecto que tiene la concentración del soluble en el control diametral empleando el soluble A.

Fecha	Concentración Soluble	Piezas Fabricadas	Dimensión de los barrenos rimados (µm)					
			Pieza 1		Pieza 2		Pieza 3	
			1	2	1	2	1	2
28.11.96	8,5	350	33	29	30	27	29	29
29.11.96	9,0	382	33	29	30	28	33	33
30.11.96	8,5	496	29	31	31	26	30	30
01.12.96	8,5	680	30	30	32	28	30	32
05.12.96	7,0	2176	27	30	29	28	28	28
06.12.96	7,5	668	32	30	31	30	27	28
07.12.96	8,5	804	27	33	31	32	30	32
08.12.96	9,0	372	28	27	26	25	27	25
09.12.96	7,5	760	31	30	31	30	27	28
13.12.96	8,0	620	24	25	24	23	23	24
14.12.96	10,0	748	27	27	27	24	23	24
15.12.96	10,0	601	24	23	22	25	22	23
16.12.96	7,5	567	28	26	23	29	26	27
19.12.96	7,0	260	27	33	27	30	27	28
20.12.96	8,0	608	24	24	25	25	25	25
21.12.96	8,0	1205	24	25	26	25	24	25
22.12.96	8,0	135	24	24	23	27	26	24
02.01.97	5,0	324	32	23	25	23	32	24
03.01.97	6,0	464	23	23	26	26	23	26
04.01.97	6,5	644	23	25	23	25	24	25
09.01.97	5,0	788	22	24	22	22	23	25
10.01.97	6,0	676	35	31	32	27	30	31

Tabla 5.3. Muestra el efecto que tiene la concentración del soluble en el control diametral empleando el soluble B.

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Después de analizar los resultados anteriores se llegó a lo siguiente: el número de filos de las herramientas de corte no tiene ningún efecto en la selección del soluble. La selección de los parámetros de corte no presentó ninguna afectación en el control de las tolerancias dimensionales del barreno rimado empleado tanto en el soluble A como en el soluble B. Existe una diferencia importante entre los componentes químicos de los solubles, el soluble B contiene cloro y el soluble A no. El cloro es un elemento químico sumamente agresivo que ataca drásticamente la piel de los operarios como el material de las máquinas. Este elemento químico se utiliza entre otras cosas para mantener bajo el nivel de bacterias que se reproducen en los solubles de corte y con ello evitar que dañe la emulsión de la unión aceite y agua y evite el desagradable olor que esto ocasiona.

Las siguientes tablas muestran los estudios estadísticos comparativos de los dos solubles de corte:

ANALISIS ESTADISTICO	SOLUBLES TIPO "A" DE CORTE PARA ALUMINIO					
	PIEZA 1		PIEZA 2		PIEZA 3	
Límite superior	35	35	36	36	36	35
Límite inferior	31	31	31	31	31	31
Media geométrica	32.66	32.71	32.47	32.52	32.78	32.70
Varianza	1.4654	1.1602	1.5000	1.4978	2.0606	1.3506
Mediana	32	33	32.5	32.	32.5	32.5
Desviación estándar	1.2105	1.0771	1.2247	1.2239	1.4355	1.1622
Moda	32	33	33	32	32	32

ANALISIS ESTADISTICO	SOLUBLES TIPO "B" DE CORTE PARA ALUMINIO					
	PIEZA 1		PIEZA 2		PIEZA 3	
Límite superior	35	33	32	30	33	33
Límite inferior	22	23	22	22	23	23
Media geométrica	23.676	24.257	23.293	23.657	23.058	24.056
Varianza	44.893	38.565	41.134	32.806	38.601	36.091
Mediana	27	27	26	26	27	26
Desviación estándar	6.700	6.210	6.414	5.728	6.213	6.008
Moda	24	30	31	25	30	25

Tabla 5.4. Resultados estadísticos de los solubles A y B.

### 5.5. ESTUDIO III. TIPO DE DESGASTE Y VIDA ÚTIL DE LAS HERRAMIENTAS,

La intención de esta tercera etapa de la experimentación es encontrar la relación de los diferentes tipos de desgaste y la duración de las herramientas, con la finalidad de entender cual es la causa que ocasiona el desgaste y con ello, procurar mantener controlada la durabilidad de la herramienta de corte,

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

identificando el tipo de desgaste e interpretándolo como si fuera una huella digital para regular, en lo posible, la vida útil de las herramientas de corte.

Debido a la amplia gama de herramientas que se emplean en el maquinado de aluminio y sus aleaciones, el estudio se concentró solo en aquellas herramientas que son de uso común en este proceso, como es el caso de los formadores, brocas de carburo de tungsteno, rimas y cortadores con insertos de diamante, mostrando mediante los registros correspondientes, la influencia en los procesos de maquinado y variabilidad del funcionamiento de las herramientas dentro del mismo. Este trabajo se enfoca al desgaste de una herramienta en específico, es por ello que se limita a mostrar sólo un caso de desgaste para cada una de las herramientas, marcando específicamente el tipo de mecanismo de desgaste que se presenta e indicando la vida útil de la misma. Asimismo, se considerarán todos los parámetros de corte constantes para evitar inconsistencia en las pruebas, así como cualquier variación que pudiera llegar a afectar directamente a la productividad. De la misma manera la concentración del soluble se establece en función de la herramienta que más cantidad de aceite requiere.

Así, el objetivo de esta sección es buscar una relación experimental que permita determinar la duración promedio de las diferentes herramientas empleadas en el maquinado de estas aleaciones de aluminio, tomando como punto de partida la longitud de corte en milímetros recorridos. Las variables más sobresalientes en este proceso son: los parámetros de corte, la distancia total de corte y la concentración del soluble.

### **5.5.1. DESARROLLO.**

El desarrollo de la experimentación consiste en llevar un registro de cada una de las herramientas sobre la base del número de ciclos de maquinado, hasta que la herramienta ya no cumple con la tolerancia geométrica para la cual fue diseñada, afectando directamente la calidad del producto. Para esto se hicieron las siguientes suposiciones:

- Los parámetros de corte se mantuvieron constantes a la velocidad máxima permisible para ese material, controlando estrictamente las tolerancias geométricas de la pieza mediante un monitoreo empleando una máquina de medición por coordenadas. La máquina tiene las siguientes características técnicas: una máquina de medición de control numérico, una mesa de trabajo de 1500 mm en el eje X, 900 mm en el eje Y e 700 mm en el eje Z, velocidad máxima de 12 pulgadas por segundo y una aceleración de 2400 mm<sup>2</sup>/seg, rango de temperatura óptimo para su funcionamiento ideal de 18 a 22 °C, repetibilidad de una medición a otra de 2 µm, un error en el proceso de barrido de la superficie de 3 µm y cabezal adaptador para colocar el

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

palpador esférico, este palpador es rubí, para garantizar tanto la redondez, dureza del material y repetibilidad durante el proceso de medición.

- Se efectuaron los experimentos en un solo centro de maquinado con una posibilidad de error de 9  $\mu\text{m}$ , así como una excentricidad de 20  $\mu\text{m}$  con una herramienta de 200 mm de largo, la cual es la falla permisible del Centro de Maquinado estipulada por el fabricante de la máquina.
- La concentración del soluble para estas condiciones de maquinado se mantuvo dentro de un rango máxima de variación de 2 % a un 6%, lo cual es lo que recomienda el fabricante del soluble de corte para obtener las condiciones óptimas para el maquinado sin que se presenten fallas en las tolerancias geométricas de las piezas.
- El aluminio utilizado fue A380 (SAE A380.1) con los siguientes componentes de la aleación:
  - Si (7.5 - 9.5)
  - Fe (1)
  - Cu (3. - 4)
  - Mn (0.5)
  - Mg (.1)
  - Ni (0.3)
  - Zn (3.)
  - Sn (0.35)
  - El resto es aluminio.
  
- La pieza fue obtenida mediante el proceso de fundición a presión.

Se emplearon diferentes tipos de herramientas de corte (cortadores, brocas, rimas, formadores, etc.) Se utilizaron como materiales de las herramientas, diamante industrial, carburo de tungsteno, herramientas de aceros de alta velocidad (HSS) con recubrimiento de cromo duro, para proporcionarle mayor resistencia al desgaste.

Las herramientas que se consideraran para el maquinado de una pieza de aluminio son las siguientes.

1. Formador de diámetro 6 mm con un paso de 1 mm (M6X1) de acero de alta velocidad con recubrimiento de cromo duro.
2. Cortador diámetro 63 mm con cuatro insertos de diamante.
3. Broca de carburo de tungsteno escalonada diámetro 5.5 mm
4. Rima de carburo de tungsteno de diámetro 5mm con seis filos y una tolerancia diametral E8 (5.022 a 5.042)

## **5.5.2. CONDICIONES DE MAQUINADO.**

En esta sección se describirá de manera general todas las condiciones de corte para el maquinado del aluminio, describiendo de manera somera las características de la máquina, las condiciones de corte que en general se utilizan en cada herramienta de corte, la afectación del soluble de corte y algunos aspectos adicionales.

**1) Máquinas.** El primer paso para poder efectuar un estudio crítico del desgaste de las herramientas es definir en qué condiciones se van a evaluar y en qué tipo de equipos se llevarán a cabo los experimentos correspondientes. Para ello se cuenta con una máquina de control numérico computarizado con controlador SIEMENS y las siguientes condiciones físicas:

- Centro de maquinado con una capacidad de 20 herramientas.
- Posibilidad de cambio de herramientas en 6 segundos máximo
- El husillo alcanza una velocidad de 10,500 r.p.m.
- El desplazamiento de los ejes X, Y, Z es de 40 metros por minuto en cada uno de ellos.
- Giro del cuarto eje con una rapidez de 3 segundos por revolución.

**2) Parámetros de corte.** El segundo paso es determinar las condiciones de corte del proceso, para ello se consideran las siguientes reglas:

- La velocidad de corte de las brocas:
  - Para carburo de tungsteno de calidad K10<sup>3</sup>, varía entre 170 a 250 metros por minuto, dependiendo del diámetro de las herramientas, de la forma de la herramienta, del proceso de fundición mediante el cual se obtuvo la pieza y este puede ser por fundición a presión o por fundición por gravedad, de la forma de sujeción, etc.
  - Para los aceros de alta velocidad varía entre 70 y 110 metros por minuto, dependiendo si el barreno está abierto o es cerrado.
  - Para brocas con algún tipo de recubrimiento (cromo duro, nitruro de titanio, diamante, etc.), varía dependiendo del tipo de recubrimiento, pero ésta se mantiene controlada dentro de un rango de 170 a 250 metros por minuto, dependiendo del diámetro de la herramienta, del material a cortar, del proceso de fundición con el cual se obtuvo la pieza que puede ser por fundición a presión o por fundición por gravedad, del acabado deseado, etcétera.
- La velocidad de corte de los formadores se considera de 30 - 45 metros por minuto, pero este factor depende básicamente del tipo de sujeción, de si la pieza se obtiene de fundición a presión

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

o por fundición por gravedad. Una característica que se presenta regularmente durante el maquinado con estas herramientas es el diámetro interior de la cuerda, ya que de alguna manera controla las condiciones de corte durante el formado. Por otro lado, existen diferentes tipos de recubrimientos que permiten incrementar la durabilidad de la herramienta.

- La velocidad de corte para los cortadores con insertos de diamante, se considera la máxima (10,500 - 20,000 r.p.m.) que brinda la máquina, debido primordialmente a que el aluminio es un metal muy suave y el diamante es un material extremadamente duro.
- Para los escariadores de carburo de tungsteno se considera una velocidad de corte de 30 a 65 metros por minuto. Dicha velocidad para este tipo de herramientas está influenciada directamente por el tipo de soluble, concentración del propio soluble, condiciones físicas de la máquina, etc.

**3) Concentración del soluble.** A pesar de que en la mayoría de las industrias de corte de metales solo se le da un pequeño valor agregado al soluble, éste juega un papel preponderante en todo el proceso de corte de materiales, debido, entre otras, a las siguientes ventajas:

- Aumenta la durabilidad de la herramienta
- Retira el calor generado durante el corte
- Lubrica durante el corte
- Retira la viruta de la zona de corte.
- Evita la formación prematura de filos recrecidos
- Protege las superficies maquinadas

En el proceso de maquinado se puede observar la influencia que tiene sobre la tolerancia geométrica del barreno, y por otro lado se puede considerar que la concentración del soluble básicamente depende de dos cosas:

- La calidad de las sustancias que se emplean como refrigerante y la cantidad de cada uno de sus componentes.
  - Agentes olorizantes
  - Agentes antiespumantes
  - Agentes anticorrosivos
  - Agentes antibacterianos
- El tipo de herramientas de corte, tomando en cuenta básicamente, la operación que ésta realiza.

---

<sup>3</sup> K10 Ver capítulo de materiales de las herramientas

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACIÓN. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- **Formador.** La concentración recomendada es del 5 al 8% dependiendo del diámetro a formar (el máximo diámetro que se recomienda formar en aluminio es de  $\varnothing$  14 mm.).
- **Broca.** La concentración recomendada es del 4 al 6% dependiendo si la pieza es obtenida por fundición a presión o por fundición por gravedad y las condiciones previas de la zona a maquinar.
- **Rima o escariador.** En este tipo de herramientas, los rangos de concentración del soluble son muy variables, ya que por un lado dependen directamente del tipo de proceso y por otro lado de la configuración de la herramienta. La concentración para estas herramientas varía desde 6% hasta 12%.
- **Cortadores con insertos de diamante.** Estos tipos de herramientas pueden trabajar sin la necesidad de emplear solubles de corte, ya que la herramienta es extremadamente dura y el soluble de corte sólo se emplearía para enfriar la pieza de trabajo, proteger la superficie maquinada, etcétera. La concentración que se recomienda para este tipo de herramientas es de 3 al 5%.

**4) Otras.** Podrían ser bastantes las condiciones que se encuentran presentes dentro de un proceso para poder determinar quizá su mejor influencia en el proceso de maquinado y por ende, en las herramientas de corte. Es por ello que sólo se enlistan algunas de las más importantes:

- **Sistemas de sujeción de las piezas.** Esta condición permite asegurar que la pieza no se mueva durante el maquinado y pueda romper la herramienta.
- **Cimentación de la máquina.** Cuando una máquina se encuentra bien cimentada no provoca variaciones durante el proceso de maquinado, especialmente en las herramientas de escariado, ya que es posible una variación considerable (2 -10 micrómetros) cuando la máquina está mal cimentada.
- **Ajuste de las herramientas de corte.** Esta condición se presenta regularmente en el caso de los escariadores o barras de mandril con los cuales se requiere lograr un barreno con una cierta exactitud diametral.
- **Geometría de corte.** Esta es una característica intrínseca de las herramientas, ya que una geometría mal empleada puede ocasionar problemas de desgaste o malos acabados de la pieza por arranque de material.
- **Material de corte.** Es importante la adecuada selección del material de la herramienta para obtener la mejor relación de beneficio - costo - calidad
- **Material de trabajo.** Es importante que el material de trabajo cumpla con las características tanto físicas como químicas para mantener la estabilidad durante el proceso de maquinado.



### **5.5.3. REGISTROS DE LA DURABILIDAD DE LAS HERRAMIENTAS.**

En esta sección se analizan a detalle las condiciones de corte para los diferentes materiales que se emplean en el maquinado de aluminio y sus aleaciones con el propósito de determinar la vida promedio de una herramienta de corte así como los mecanismos de desgaste que se presentan durante la operación de maquinado y proporcionar algunas recomendaciones para controlar o minimizar el desgaste de las herramientas.

El procedimiento para tomar las lecturas consistió en lo siguiente:

- 1.- Caracterizar la herramienta de corte, indicando el tipo de material, si tiene recubrimiento o no, de cuantos filos es la herramienta, si es una herramienta de desbaste o acabado, etc.
- 2.- Registrar la fecha de colocación de la herramienta en la máquina.
- 3.- Establecer un número de ciclos base.
- 4.- Monitorear de forma visual la herramienta mediante un comparador óptico de 20 aumentos
- 5.- Verificar los aspectos siguientes:
  - Si la herramienta llega a los ciclos base, agregar más ciclos.
  - Si la herramienta no llega a los ciclos base, tomar este nuevo número como base.
  - Detectar el tipo de desgaste que se presentó en la herramienta.
- 6.- En base a la durabilidad que se presente en las herramientas, establecer un ciclo promedio de vida.

#### **5.3.3.1. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN UN FORMADOR.**

Los resultados de la primera experimentación realizada se muestran en la tabla 5.5, en ella se aprecia claramente la durabilidad de los formadores de aceros de alta velocidad con recubrimiento de cromo duro. En la figura 5.5., obtenida de la observación en un microscopio óptico a 72 aumentos, se distinguen directamente los mecanismos de desgaste por desafilado de la herramienta. Por la experiencia que se ha tenido con diferentes procesos similares y con un análisis empírico el fenómeno de desgaste lo ocasiona un sinnúmero de acciones, entre las que se destacan primordialmente los altos esfuerzos a los que se encuentra sometida la herramienta durante el corte, el alto contenido de silicio que contiene la fundición y que por su elevada dureza acelera el desgaste de las herramientas provocando que algunas herramientas presenten mayor durabilidad que otras, es por ello que se requiere mantener constante el contenido de silicio dentro de la tolerancia de 7.9 a 9.5 % durante todos los procesos de inyección de piezas fundidas. De aquí que, el elevado desgaste por destalonado en los filos de corte así como el desgaste por cráter se manifiestan como surcos en la cresta de la herramienta y como una excesiva abrasión de la herramienta.

CAPÍTULO V EXPERIMENTACION. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

FECHA	PARÁMETROS DE LA PRUEBA			VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	TIEMPO DE VIDA ÚTIL (min)	CONCENTRACION DE ALUMINIO (%)
	Temperatura (°C)	Distancia (mm)	Velocidad (mm/min)			
08.01.96	38	2000	1	24	480	2
08.01.96	38	2000	1	15	290	2
08.01.96	38	2000	1	44	880	2
11.01.96	38	2000	1	281	5620	6
15.01.96	38	2000	1	379	7580	7
24.01.96	38	2000	1	272	5440	6
29.01.96	38	2000	1	296	5920	6
06.02.96	38	2000	1	113	2270	3
11.02.96	38	2000	1	359	7180	6
19.02.96	38	2000	1	205	4110	4
20.02.96	38	2000	1	47	940	2
26.02.96	38	2000	1	418	8360	7
04.03.96	38	2000	1	265	5290	5
07.03.96	38	2000	1	293	5860	6
11.03.96	38	2000	1	271	5420	6
16.03.96	38	2000	1	303	6070	6
24.03.96	38	2000	1	255	5090	5
05.04.96	38	2000	1	284	5670	6
14.03.96	38	2000	1	216	4310	4
28.04.96	38	2000	1	293	5860	6
03.05.96	38	2000	1	245	4900	5
08.05.96	38	2000	1	260	5210	5
18.05.96	38	2000	1	274	5480	6
26.05.96	38	2000	1	90	1800	3
06.06.96	38	2000	1	251	5020	5
11.06.96	38	2000	1	350	7010	6
19.06.96	38	2000	1	262	5250	5
27.06.96	38	2000	1	280	5590	6
08.07.96	38	2000	1	301	6020	6
30.07.96	38	2000	1	284	5670	6
06.08.96	38	2000	1	273	5470	6
14.08.96	38	2000	1	255	5090	4
19.08.96	38	2000	1	283	5670	5
24.08.96	38	2000	1	184	3680	3
01.09.96	38	2000	1	238	4750	4
12.09.96	38	2000	1	273	5450	5
17.09.96	38	2000	1	273	5470	5
22.06.96	38	2000	1	283	5660	6
02.10.96	38	2000	1	395	7910	6
11.10.96	38	2000	1	443	8860	8
24.10.96	38	2000	1	355	7100	7
01.11.96	38	2000	1	347	6940	7
09.11.96	38	2000	1	418	8360	7
18.11.96	38	2000	1	250	5000	4
22.11.96	38	2000	1	302	6040	6
28.11.96	38	2000	1	356	7120	6
05.12.96	38	2000	1	379	7580	7
15.12.96	38	2000	1	478	9570	8

TABLA 5.5 Comportamiento de la vida útil de un formador empleado en el maquinado de aluminio.



Figura 5.5. Muestra el desgaste por destalonado y por cráter de los filos de corte del formador de HSS con recubrimiento de cromo duro que ha maquinado 3000 metros. Foto obtenida en un microscopio óptico a 72x aumentos.

#### **5.3.3.1.1. TIPOS DE DESGASTE Y RECOMENDACIONES.**

Enseguida se detallan los principales mecanismos de desgaste en los formadores de HSS con recubrimiento de cromo y las recomendaciones para aumentar la vida útil de la herramienta. Cada mecanismo de desgaste se presenta aislado o en combinación con otros mecanismos que requieren realizar diferentes acciones para controlar el desgaste y en algún momento las recomendaciones llegan a ser contradictorias durante el proceso de maquinado. La tabla 5.5 es una recopilación de información durante un año de estudio y la fotografía 5.5 es una muestra representativa.

##### **a) Desconchados en las aristas de corte (cargas térmicas).**

- Utilizar metal mas duro y tenaz
- Aumentar la velocidad de corte
- Emplear una gran cantidad de soluble o eliminarlo. No emplearse cortes intermitentemente.

##### **b) Desgaste prematuro.**

- Grado de dureza de la herramienta:
  - Emplear metal mas duro con mayor resistencia al desgaste.
  - Emplear herramientas recubiertas
- Incrementar el flujo del refrigerante
- Incrementar el radio de la herramienta.

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

- Reducir la vibración de la máquina.
- Verificar que la altura de la punta de la herramienta este sobre el centro.

### **c) Deformación del filo de corte**

- Emplear herramientas con un mayor grado de dureza para aumentar la resistencia al desgaste.
- Incrementar el flujo de soluble
- Reducir la velocidad de corte

### **d) Desconchados o astillado en las aristas de corte (carga mecánica)**

- Utilizar metal duro más tenaz
- Incrementar la velocidad de corte
- Comprobar la rigidez de la máquina, de la herramienta así como del sistema de sujeción.
- Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
- Incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco

### **5.3.3.2. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN LAS BROCAS DE CARBURO DE TUNGSTENO**

Los resultados del estudio del desgaste de este tipo de herramientas se presentan de modo explícito en la tabla 5.6. Se puede apreciar la gran variación que se presenta en la durabilidad de este tipo de herramientas. En la figura 5.6. se muestran algunas fotografías donde se puede apreciar los mecanismos de desgaste encontrados, resaltando los filos recrecidos, los choques térmicos en la punta de la herramienta, la formación de cráteres y el desgaste por destalonado. Todos los tipos de desgaste antes mencionados, que se manifiestan en este tipo de herramientas, se deben primordialmente a las altas velocidades de corte, a la ausencia de soluble en cierto momento, al maquinado de barrenos ciegos, al contenido de silicio de la fundición, al tipo de sujeción, etcétera. A pesar de llegar a tener identificado el tipo de desgaste es prácticamente imposible controlarlo por un periodo de tiempo dado, ya que cualquier desgaste depende básicamente de los parámetros de corte, los solubles de corte, la composición química de la pieza a maquinar, etc.

Para poder determinar fehacientemente la condición de maquinado que se presentó durante el uso de estas herramientas, se seleccionaron solo aquellas en donde se obtuvo la máxima durabilidad, como se muestra en la tabla 5.6.

**CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS**

FECHA	VELOCIDAD DE AVANCE (mm/min)	VELOCIDAD DE ROTACION (rpm)	AVANCE POR REVOLUCION (mm/rev)	TEMPERATURA DE LA ZONA DE MAQUINADO (°C)	ENERGIA DE MAQUINADO (W)	TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE MAQUINADA (°C)
16.06.95	180	10500	0,35	73	2680	6
25.06.95	180	10500	0,35	73	2680	6
03.07.95	180	10500	0,35	73	2680	6
05.08.95	180	10500	0,35	58	2140	6
19.10.95	180	10500	0,35	131	4820	7
03.11.95	180	10500	0,35	64	2360	7
10.11.95	180	10500	0,35	73	2680	7
16.11.95	180	10500	0,35	58	2140	7
28.11.95	180	10500	0,35	131	4820	6
06.12.95	180	10500	0,35	85	3110	5
17.12.95	180	10500	0,35	117	4290	6
05.01.96	180	10500	0,35	123	4520	6
24.01.96	180	10500	0,35	59	2180	5
03.02.96	180	10500	0,35	59	2180	6
15.02.96	180	10500	0,35	61,9	2274	6
03.03.96	180	10500	0,35	131,3	4824	7
25.03.96	180	10500	0,35	98,5	3621	6

Tabla 5.6. control de la vida útil de una broca de carburo de tungsteno  $\phi$  6.5 con 3 filos

25.192,8 Total de ciclos maquinados por la broca de carburo de tungsteno  $\phi$  6.5

100.771,0 Total de piezas maquinadas

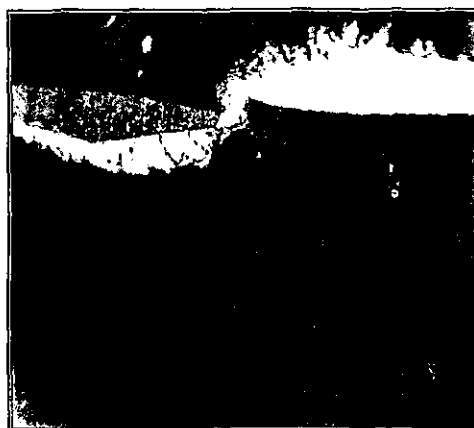
1.469,7 Tiempo total de maquinado en minutos (24.5 hrs)

5.401,3 Longitud de corte en m por la broca de carburo de tungsteno (5.4 Km.)

(a)



(b)



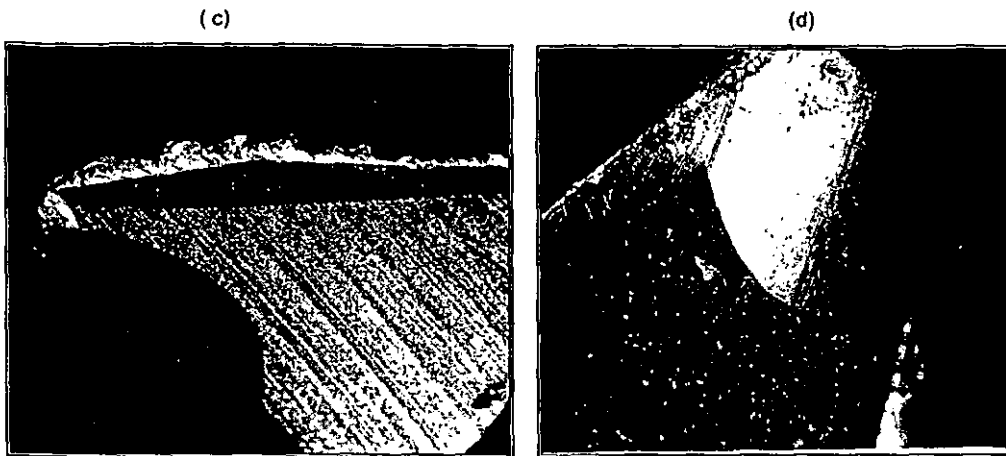


Figura 5.6. Diferentes vistas de una broca de carburo de tungsteno en la cual se puede apreciar diferentes mecanismos de desgaste que pueden experimentarse, estas fotos fueron sacadas a 72x aumentos en un microscopio óptico

#### 5.3.3.2.1. TIPOS DE DESGASTE Y RECOMENDACIONES.

Enseguida se detallan los principales mecanismos de las brocas de carburo de tungsteno y las recomendaciones para aumentar la vida útil de la herramienta. Cada mecanismo de desgaste se presenta aislado o en combinación con otros mecanismos que requieren realizar diferentes acciones para controlar el desgaste y en algún momento las recomendaciones llegan a ser contradictorias durante el proceso de maquinado. La tabla 5.6 es una recopilación de información durante un año de estudio y la fotografía 5.6 es una muestra representativa.

##### a) Desconchados o astillado en las aristas de corte (carga mecánica)

- Utilizar metal duro más tenaz
- Incrementar la velocidad de corte
- Seleccionar ángulos de corte negativos (bisel de estabilización)
- Comprobar la rigidez de la máquina, de la herramienta tanto como del sistema de sujeción.
- Disminuir el avance por diente
- Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
- Incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco
- Reducir el ángulo de salida o de alivio de la herramienta
- Reducir la profundidad de corte

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

### b) Desgaste considerable por destalonado

- Emplear metal duro más resistente al desgaste
- Aumentar el avance por diente

### c) Formación de filos recrecidos

- Aumentar la velocidad de corte y/o avance
- Emplear otra calidad de metal duro
- Utilizar filos rectificadas y ángulos de corte positivos

### 5.3.3.3. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN LOS CORTADORES CON INSERTOS DE DIAMANTE.

En la figura 5.7 se aprecian las fotografías en las cuales se muestran los mecanismos de desgaste a los cuales se ve sujeto un inserto de diamante. Entre los principales tipos de desgaste que se presentan en los insertos de diamante están el destalonado y el ocasionado por las cargas mecánicas.

FECHA	AVANCE (mm)	VELOCIDAD (m/min)	AVANCE POR DIENTE (mm)	TIEMPO DE MAQUINADO (min)	PIEZAS MAQUINADAS	TIEMPO DE MAQUINADO (días)
06.08.95	2640	10500	0,4	1286	5400	6
08.12.95	2640	10500	0,4	1278	5367	6
24.02.96	2640	10500	0,4	71	300	6
27.02.96	2640	10500	0,4	71	299	5
01.03.96	2640	10500	0,4	737	3094	6
15.04.96	2640	10500	0,4	29	120	7
16.04.96	2640	10500	0,4	28	119	6
17.04.96	2640	10500	0,4	28	119	6
18.04.96	2640	10500	0,4	29	120	7
19.04.96	2640	10500	0,4	23	98	6
20.04.96	2640	10500	0,4	28	119	6
22.04.96	2640	10500	0,4	147	618	6
29.04.96	2640	10500	0,4	2009	8436	5
04.09.96	2640	10500	0,4	1994	8376	5
10.12.96	2640	10500	0,4	158	663	6
16.12.96	2640	10500	0,4	695	2921	7
24.02.97	2640	10500	0,4	336	1411	7

Tabla 5.7. Control de la vida útil de un cortador con 4 insertos de diamante

53.636	Total de ciclos maquinados por un cortador con insertos de diamante
187.909	Total de piezas maquinadas con cuatro insertos de diamante
8.948	Tiempo total de maquinado en minutos (6.21 días)
37.582	Longitud de corte en m por los cuatro insertos (9.395.5 km. por inserto)

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION. PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en las pruebas se presentan en la tabla 5.7., en donde se reporta la vida útil de los insertos de diamante. Es importante resaltar que a pesar de que los tres insertos están montados en la misma herramienta, éstos se ven sujetos a diferentes tipos de desgaste y esto es debido principalmente a que en algunos casos se llega a tocar ligeramente el dispositivo de maquinado, o la fundición trae ligeras incrustaciones de carburos.

Las figuras 5.7a, 5.7b y 5.7c muestran una vista frontal y una vista superior de cada inserto denotadas como **a** y **a1** para el primer inserto, **b** y **b1** para el segundo y por último **c** y **c1** para el tercero. En la figura **d** se aprecia un inserto de diamante nuevo, para emplearlo como punto de comparación con los demás insertos.

(a)



(b)



(c)





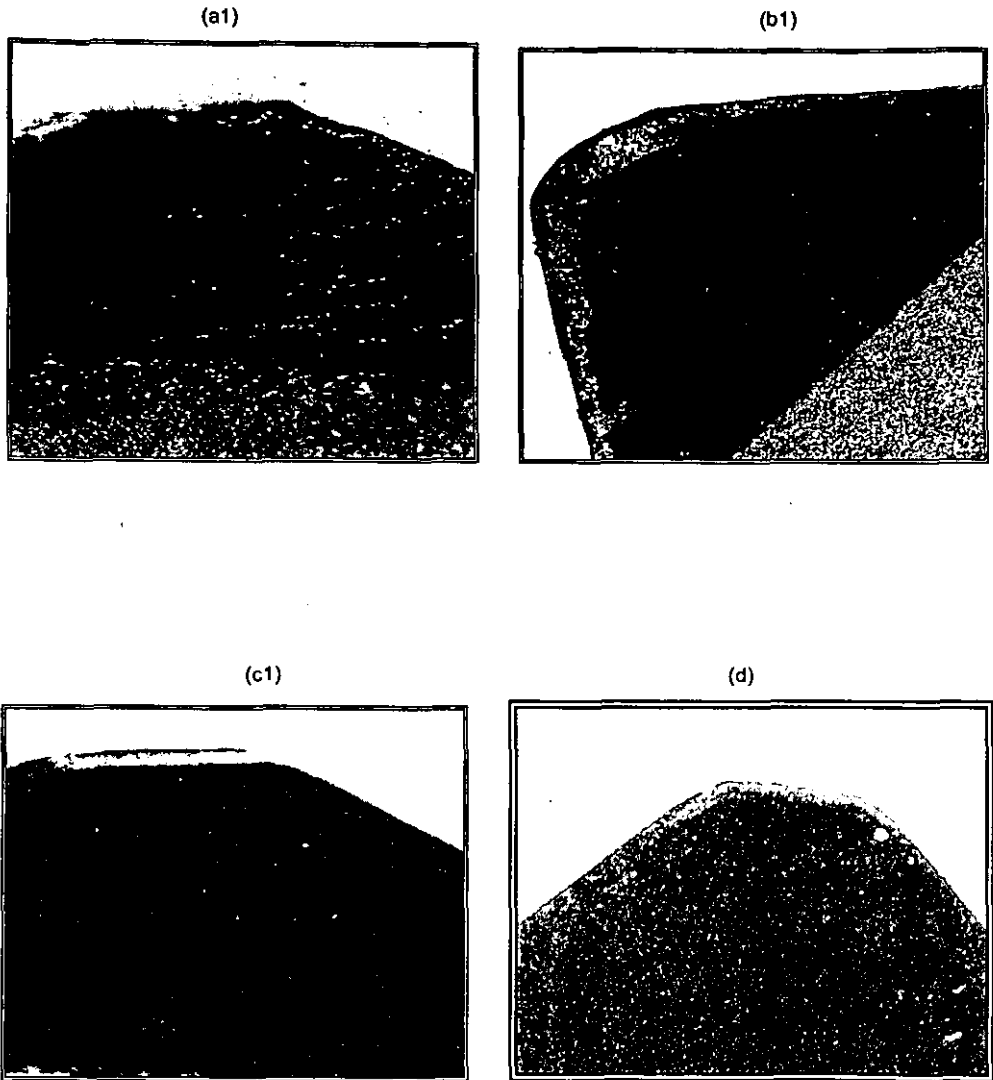


Figura 5.7. Muestra en los incisos a, b, c, tres insertos que se emplearon para el maquinado de aluminio montados en un cortador de  $\varnothing 63$  y en el d un inserto de diamante nuevo. Fotos obtenidas mediante un microscopio óptico a 72X aumentos

Una característica importante de los insertos de diamante es que mantienen sus propiedades durante un largo tiempo y al final de su vida útil el periodo de falla es relativamente pequeño. Es posible usar este tipo de insertos sin la necesidad de emplear soluble para enfriar la herramienta y la pieza, ya que del 15 al 20 % del calor lo disipa el inserto, el 5 al 10% la pieza y el resto es desalojado por la viruta al momento del

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

corte. Aun, así es conveniente emplear el soluble de corte por las características adicionales que aporta durante el proceso de corte. Esto lleva a afirmar que el diamante después de haber cortado kilómetros de material, llega al fin de su vida útil en un instante relativamente corto y por lo general, el mecanismo de desgaste presente es por destalonado o por choques térmicos producto del severo trabajo al que estuvo expuesto o por algún tipo de carga mecánica excesivamente grande producto de un choque con el dispositivo de maquinado, incrustaciones en la fundición o una exagerada profundidad de corte.

### **5.3.3.3.1. TIPOS DE DESGASTE Y RECOMENDACIONES.**

#### **a) Desconchados en las aristas de corte (cargas térmicas)**

- Utilizar metal mas duro y tenaz
- Disminuir el avance por diente
- Aumentar la velocidad de corte
- Seleccionar ángulos de corte positivos
- Emplear una gran cantidad de soluble o eliminarlo. No emplearse cortes intermitentemente.

#### **b) Desconchados o astillado en las aristas de corte (carga mecánica)**

- Utilizar metal duro más tenaz
- Incrementar la velocidad de corte
- Seleccionar ángulos de corte negativos (bisel de estabilización)
- Comprobar la rigidez de la máquina, de la herramienta y del sistema de sujeción.
- Disminuir el avance por diente
- Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
- Incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco
- Reducir el ángulo de salida o de alivio de la herramienta
- Reducir la profundidad de corte

#### **c) Ejes de corte con fisuras.**

- Emplear herramientas con suficiente grado de dureza
- Preparar bien los filos de corte con un incremento en los radios de filos
- Incrementar la velocidad del husillo
- Reducir el avance
- Verificar la rigidez de la pieza y de la máquina
- Verificar la deflexión de la herramienta incrementando el zanco y reduciendo la longitud del zanco.
- Decrementar el ángulo de alivio.
- Verificar que el centro de corte de la herramienta no se encuentre por arriba.
- Reducir la profundidad de corte.

**5.3.3.4. MECANISMOS DE DESGASTE PRESENTES EN LOS ESCARIADORES DE CARBURO.**

En este estudio se aprecia la durabilidad de los escariadores de carburo. Estas herramientas están diseñadas para retirar como máximo material de 0.4 mm del diámetro, ya que de otra manera sería muy difícil controlar tanto la tolerancia del rimado como el acabado. En este tipo de herramientas, la principal fuente de deterioro es el desgaste por destalonado, choques térmicos, formación de filos recrecidos y formación de cráteres, como se muestra en la figura 5.8.

En la actualidad existe una gran cantidad de empresas que invierten grandes cantidades de dinero en el diseño y elaboración de rimas con insertos de diamante, ya que este material se trabaja con mayores velocidades de corte, mayor avance y combinándolas con el soluble adecuado se obtienen mejores acabado. A pesar de que los insertos de diamante son extremadamente caros, para altos índices de producción son la mejor opción debido a que emplean velocidades de corte superiores a los 4000 m/min. y el avance por inserto es de 0.12 mm/rev., lo cual en comparación con insertos de carburo, en donde las máxima velocidad de corte es de 1000 m/min. y el avance es de 0.07 mm/rev., asimismo, el periodo de duración de los insertos de diamante es de aproximadamente 15 km. y su precio se amortiza rápidamente.

FECHA	PARAMETROS DE CORTE			TIEMPO (min)	LONGITUD DE CORTE	ORIENTACION DE SIEMBRA
	VELOCIDAD (m/min)	REVOLUCIONES (rpm)	AVANCE (mm/rev)			
21.04.95	60	3200	0,2	945	6050	8
12.07.95	60	3200	0,2	551	3530	5
20.09.95	60	3200	0,2	684	4380	5
24.11.95	60	3200	0,2	256	1640	3
13.12.95	60	3200	0,2	261	1670	3
09.01.96	60	3200	0,2	370	2370	3
07.02.96	60	3200	0,2	53	340	3
09.02.96	60	3200	0,2	50	320	3
15.02.96	60	3200	0,2	291	1860	3
11.03.96	60	3200	0,2	210	1340	3
11.04.96	60	3200	0,2	420	2690	4
22.06.96	60	3200	0,2	586	3750	5
15.08.96	60	3200	0,2	590	3780	5
03.09.96	60	3200	0,2	417	2670	4

Tabla 5.8 control de la vida útil de un escariador de carburo 5 E8 con 4 filos

- 54142,0 Total de ciclos maquinados por el escariador 5 E8
- 216568,0 Total de piezas maquinadas
- 5684,9 Tiempo total de maquinado en minutos (94.75 hrs.)
- 3638,3 Longitud de corte en m por el escariador 5 E8 (3.64 km.)

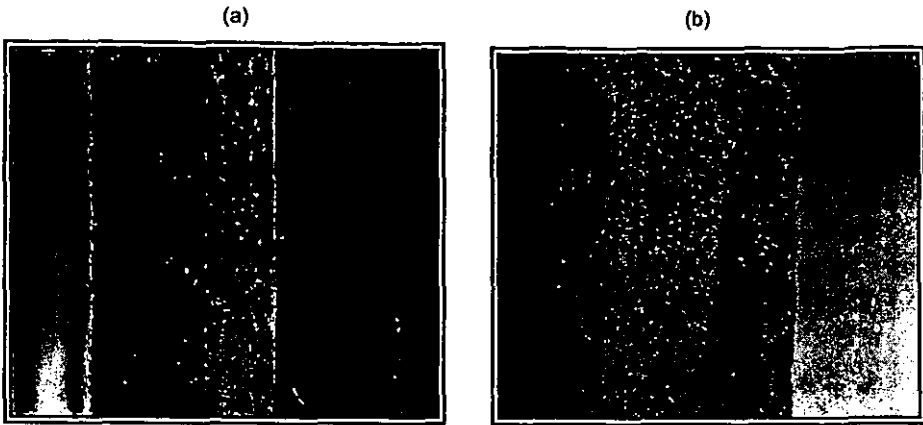


Figura 5.8. Las fotografías muestran el desgaste de las rimas de carburo de tungsteno de cuatro filos. Las fotos se tomaron en un microscopio óptico a 72x aumentos.

#### **5.3.3.4.1. TIPOS DE DESGASTE Y RECOMENDACIONES.**

Enseguida se detallan los principales mecanismos de desgaste en los escariadores con insertos de carburo de tungsteno y las recomendaciones para aumentar la vida útil de la herramienta. Cada mecanismo de desgaste se presenta aislado o en combinación con otros mecanismos que requieren realizar diferentes acciones para controlar el desgaste y en algún momento las recomendaciones llegan a ser contradictorias durante el proceso de maquinado. La tabla 5.8 es una recopilación de información durante un año de estudio y la fotografía 5.8 es una muestra representativa.

##### **a) Desconchados o astillado en las aristas de corte (carga mecánica)**

- Utilizar metal duro más tenaz
- Incrementar la velocidad de corte
- Seleccionar ángulos de corte negativos (bisel de estabilización)
- Comprobar la rigidez de la máquina, de la herramienta y del sistema de sujeción.
- Disminuir el avance por diente
- Modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales)
- Incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco
- Reducir el ángulo de salida o de alivio de la herramienta
- Reducir la profundidad de corte

## CAPÍTULO V EXPERIMENTACION, PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

### **b) Formación de filos recrecidos**

- Aumentar la velocidad de corte y/o avance
- Emplear otra calidad de metal duro
- Utilizar filos rectificadas y ángulos de corte positivos

### **c) Deformación del filo de corte**

- Emplear herramientas con un mayor grado de dureza para aumentar la resistencia al desgaste.
- Incrementar el flujo de soluble
- Reducir la velocidad de corte
- Reducir el avance
- Reducir la profundidad de corte

### **5.3.4. RELACION COSTO-BENEFICIO EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS.**

Los fabricantes que se encargan de hacer la producción de la pieza en aluminio a gran escala tienen la responsabilidad de lograr la mejor relación beneficio - costo. Por lo tanto, los ingenieros de las áreas productivas y ingenieros de manufactura buscan incansablemente obtener la mejor calidad del producto al menor costo posible. Esto es debido primordialmente a que todas las herramientas de maquinado no son pagadas por los clientes, (solo en aquellos caso en donde la herramienta excede el valor de 3,000 dólares) sino son diseñadas por los ingenieros de manufactura acorde al proceso de manufactura de la pieza que se va a fabricar.

Esto ha llevado al empleo de herramientas poco más costosas, pero que a mediano o largo plazo resultan mucho más redituables, brindando además una mayor repetibilidad y confianza en las tolerancias geométricas de la pieza.

Esto se aprecia en las siguientes relaciones de costo - longitud de corte durante el maquinado de los insertos de carburo de tungsteno y de diamante. Sin embargo, se muestra que a pesar del alto costo del inserto de diamante en comparación del inserto de carburo, para cualquier proceso de alta producción es preferible maquinar con insertos de diamante, ya que la relación costo - beneficio entre el diamante y el carburo es bastante considerable.

HERRAMIENTA	LONGITUD DE	COSTO	BENEFICIO/COSTO
Inserto de diamante	37.582	450	83.5
Inserto de carburo de tungsteno.	196	80	2.5
Relación	189.8 m/m	5.625 DM/DM	

TABLA 5.8. Relación de la longitud de corte contra costo del inserto.

# COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En las empresas que tienen altos niveles de producción de piezas de aluminio y sus aleaciones, existe un área de ingeniería de procesos industriales, en donde se realizan diversos estudios y se analizan los procesos de maquinado, con el objeto de optimizar los procesos y sacar el mayor aprovechamiento de las herramientas de corte, tanto en materiales de corte, geometrías de corte, etc. De igual modo, se analizan los procesos de maquinado de las piezas y se busca conseguir los niveles de calidad que demanda la industria automotriz. Sin embargo, la incertidumbre en las condiciones de corte siguen siendo un problema, esto se debe a lo intrincado y complejo que son los sistemas de maquinado, ya que no existe ninguna relación directa entre parámetros de corte, material a maquinar, sistemas de sujeción, soluble de corte, etcétera, que garantice la estabilidad del proceso durante todo el tiempo que este perdure.

En el transcurso de este trabajo se dio fiel cumplimiento a dos objetivos. A largo de los capítulos se proporcionó de manera concreta y concisa la información necesaria para resolver los problemas inherentes al maquinado de aluminio y sus aleaciones. Asimismo, se brindó un enfoque claro de las condiciones de operación de los procesos de maquinado de aluminio, analizándose las características más relevantes para el control y conservación de la calidad total de las piezas maquinadas a lo largo de la vida del producto.

Analizando de manera sistemática los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo, se concluye lo siguiente:

En el primer estudio se analizó la planicidad como una de las tolerancias geométricas más relevantes y difíciles de controlar dentro de la manufactura de piezas de aluminio y sus aleaciones, llegando a las siguientes resoluciones:

- La tolerancia de planicidad depende básicamente de la robustez de la pieza

- El sistema de sujeción de la pieza influye definitivamente en el control de la planicidad, porque el problema de no lograr las tolerancias de planicidad nace en la deformación producto del proceso de sujeción.
- La planicidad se afecta directamente por la herramienta de fresado, porque dependiendo del ángulo de los insertos, como se muestra en la figura 1.5 del capítulo uno, esta fuerza se incrementa o decrecienta, afectando directamente a la planicidad.
- El desgaste de la herramienta de corte afecta la planicidad porque aumentan la superficie de contacto entre la herramienta y la pieza, el radio o forma del inserto incrementa su forma aumentando las fuerzas de corte durante el maquinado de la superficie.
- Se demostró en las gráficas de planicidad, que esta característica no se comporta igual en máquinas gemelas, a pesar de que se tengan las mismas condiciones de operación, tanto técnicas (parámetros de corte, herramientas de corte iguales, etc.), como mecánicas (Centros de maquinado iguales, dispositivos de sujeción iguales, presión de sujeción, etc.). Esto significa que dentro de procesos de maquinado similares no es posible tener el mismo patrón de conducta en durante el proceso de fabricación de una pieza.
- En el caso de herramientas con insertos de diamante, no es necesario emplear soluble de corte.

En el segundo estudio, se analizó la influencia del soluble de corte en el proceso de escariado, para mantener un barreno de diámetro 5 con la tolerancia E8, mostrando el siguiente comportamiento:

- En las tablas 5.2. y 5.3., es posible apreciar la influencia que tiene el soluble de corte sobre el control de la tolerancia dimensional del barreno.
- En las tablas 5.2 y 5.3, se aprecia que el soluble A, varía inversamente proporcional a la concentración, porque cuando la concentración del soluble aumenta, la tolerancia del barreno rimado disminuye y la variación es mas notoria, y en el caso del soluble B, el comportamiento es mas estable y la variación de la concentración también presenta un comportamiento inversamente proporcional a la variación de la tolerancia del barreno rimado.
- Existe una notable diferencia en el control de la tolerancia entre el soluble A y el soluble B, esto se debe básicamente a la composición de los aceites lubricantes y al proceso de emulsificación del soluble y el agua.

- En la tabla 5.4 se realizó un estudio estadístico de los solubles de corte empleados durante el maquinado, destacando claramente las ventajas del soluble tipo "A" ya que su variación en los diferentes mecanismos estadísticos es mucho mas cerrada que el soluble de tipo "B".
- En la tablas 5.5, 5.6, 5.8., se muestra la influencia que tiene el soluble de corte en la durabilidad de la herramienta.
- En el caso de las rimas de carburo, la concentración del soluble es de vital importancia, porque es la responsable de la estabilidad geométrica del barreno maquinado. Estas herramientas deben trabajar con alta concentración de soluble para obtener los fines específicos. En la actualidad existe una gran variedad de fabricantes de rimas, pero en todos los casos la concentración de soluble que se maneja para el maquinado de aluminio y sus aleaciones deben de ser superiores al 7%, la cual es producto de la experiencia de los fabricantes de los solubles y de las pruebas efectuadas en campo.
- En la tabla 5.7., se analiza una herramienta con insertos de diamante. La utilización del soluble de corte en estos casos pasa a segundo término, ya que se puede prescindir de él, porque su labor principal no es enfriar la herramienta, ni sacar la viruta de la zona de corte, sino la función del soluble se limita sólo a proteger contra la oxidación a la pieza, enfriar la pieza, etc.

En la tercera parte de la experimentación se analizaron los mecanismos de desgaste presentes en las diferentes herramientas de corte que se emplean en el maquinado de aluminio y sus aleaciones, mostrando mediante algunas fotografías y a su vez proponiendo algunas recomendaciones para prevenir el deterioro futuro de las herramientas. Por lo que se comprobó que:

- En la tabla 5.5., se muestra la durabilidad de los formadores de aceros de alta velocidad con recubrimiento de cromo duro. Los principales mecanismos de desgaste son por desafilado de la herramienta y la influencia que tiene la concentración del soluble en la vida de esta herramienta, como se indica en la fotografía 5.1. El desgaste lo ocasionan un sinnúmero de acciones, entre las que se destacan primordialmente los altos esfuerzos a los que está sometida la herramienta de corte, las altas velocidades de corte y cuando el contenido de silicio es mayor a un 10 % en la fundición ya que este se comporta como un material altamente abrasivo por las altas velocidades de corte que se emplean en el maquinado de aluminio, provocando con ello que algunas herramientas presenten mayor o menor durabilidad que otras. Los desgastes más comunes son el destalonado de los filos de corte y el desgaste por cráter, que se manifiestan como surcos en la cresta de la herramienta, debido a una excesiva abrasión. Para minimizarlos



se proponen emplear metal con un recubrimiento mas duro, disminuir la velocidad de corte y emplear soluble con mejores propiedades de lubricidad. Además, los resultados muestran la influencia radical de la concentración del soluble en la vida de la herramienta. Se recomienda para obtener una mayor durabilidad de las herramientas de corte una concentración de soluble de corte alrededor de 5 al 7%.

- En la tabla 5.6., se destaca la variación de las herramientas de carburo de tungsteno, en donde se distinguen los mecanismos de desgaste, mostrados en las fotografías de la figura 5.2, tales como filos recrecidos, choques térmicos en la punta de la herramienta, formación de cráteres y el desgaste por destalonado. Estos desgastes en las herramientas los ocasionan primordialmente las elevadas velocidades de corte, la ausencia de soluble de corte en ciertos momentos, al maquinado de barrenos ciegos, el contenido de silicio de la fundición, etcétera. Una vez identificados los tipos de desgaste es factible diagnosticar las causas del mismo y proponer algunas soluciones. Como se detalló en el tema de desgaste de las herramientas de carburo de tungsteno, en estos casos se recomienda disminuir el avance por diente, aumentar la velocidad de corte, seleccionar ángulos de corte positivos, emplear una gran cantidad de soluble a una concentración de 5 a 7 %, no utilizar el soluble de manera intermitente, emplear soluble con buenas propiedades de lubricidad y utilizar filos rectificados.
- En la tabla 5.7., es posible visualizar que determinar la vida útil de los insertos de diamante por desgaste, es una tarea poco práctica debido a que un juego de insertos de diamante pueden servir para maquinar alrededor de 40 kilómetros de longitud de corte lo cual para determinadas superficies de corte de algunas piezas significa mas de un año de utilización de estos insertos, principalmente por el escaso material que se corta durante el proceso de maquinado. En las fotografías 5.3., se aprecian los mecanismos de desgaste a los cuales se ven sujetos los insertos de diamante. Entre los principales tipos de desgaste que se presentan en los insertos de diamante está el desgaste por destalonado y/o por cargas mecánicas. Las principales recomendaciones para evitar el desgaste de estas herramientas son incrementar la velocidad de corte, disminuir el avance por diente, modificar los ángulos de ataque (contactos iniciales), incrementar el diámetro del zanco y disminuir la longitud del zanco, reducir el ángulo de salida o de alivio de la herramienta, reducir la profundidad de corte y asegurar una excelente rigidez de la máquina y la herramienta de corte en el husillo de la máquina.
- En la tabla 5.8., aquí se aprecia la influencia que tiene un soluble de corte en el proceso de maquinado de las herramientas escañadoras para el control de las tolerancias dimensionales del barreno. Los principales mecanismos de desgaste presentes en estas herramientas son el desgaste por astillado en las aristas de corte (carga mecánica), formación de filos recrecidos y

deformación del filo de corte. Se recomienda para minimizar el desgaste y ampliar la vida de la herramienta, aumentar o reducir la velocidad de corte (dependiendo el tipo de desgaste), incrementar el flujo de soluble y mejorar las propiedades de lubricidad, seleccionar ángulos de corte negativos (bisel de estabilización), reducir la profundidad de corte, checar la rigidez de la máquina, de la herramienta, así como el sistema de sujeción, emplear un material de corte mas duro, etc.

Por último se efectuó un análisis comparativo de costo - beneficio de los insertos de carburo de tungsteno y los insertos de diamante, mostrando de manera concisa, que en las empresas con altos niveles productivos es preferible emplear herramientas de diamante en vez de carburo de tungsteno principalmente por los altos niveles de calidad que se logran con este material policristalino y por los elevados parámetros de corte que se emplean durante los procesos de maquinado obteniendo una considerable ventaja en la reducción del tiempo ciclo de maquinado de un proceso y obteniendo una mejor durabilidad de la herramienta.

En resumen, el objetivo principal de este trabajo es destacar algunas de las variables y factores que afectan a la calidad de la pieza maquinada, pero es importante resaltar que la calidad es una característica absoluta y No negociable, en otras palabras la calidad existe o no. Es por ello que se hace hincapié en las afectaciones y problemas que ocasiona tener algunas variables fuera de control, así mismo se resaltan sugerencias y recomendaciones para minimizarlos y controlarlos, con el único fin de conservar la calidad total en cada una de las piezas que se maquilan.

En un futuro no muy lejano será posible controlar completamente los procesos de maquinado, mediante sensores y transductores, que controlen todos los parámetros de operación, desde concentración del soluble de corte, esfuerzos a los que se encuentra sujeta la herramienta de corte en el instante del corte, los desgastes de las herramientas de corte y por ende su durabilidad, los parámetros de corte óptimos por proceso de corte, determinar en función de las cargas térmicas y mecánicas la mejor concentración del soluble de corte por proceso, etc., involucrando todas aquellas variables y factores de proceso, que hasta el momento no están al alcance de los ingenieros de proceso (tipo proceso de fundición por gravedad, tipo proceso de fundición a presión, sujeción neumática, sujeción hidráulica, material de corte de la herramienta, geometría de la herramienta, etcétera), con el fin de controlar, mantener y conservar la calidad total de la pieza durante todo el ciclo de producción.

## REFERENCIAS

- 1- The machining of metals  
E.J.A. Armarego and R.H. Brown  
Practice Hall, Inc.
- 2- Fundamentals of Metal Cutting and Machine Tools  
B.L. Juneja and G.S. Sekhon  
Wiley Eastern Limited  
edicion 1987
- 3- Metal Cutting Mechanics  
N.N. Zorev  
Milton C. Shaw  
1966
- 4- Metals Handbook  
Volumen 16  
Novena edicion  
ASM (American Society for Metals)  
1989.
- 5- Maquinado de metales con máquinas herramientas.  
John L. Feirer  
Editorial CECSA, México  
1980

- 6- Operaciones con máquinas herramientas  
Krar and Oswald  
Mc Graw Hill, México  
1991
  
- 7- Introducción a la pulvimetalurgia  
P. Molera  
Editorial Bellaterra, Barcelona  
1977
  
- 8- Desgaste de metales  
A.D. SARKAR  
Editorial. LIMUSA  
1990
  
- 9- Cutting and Grinding Fluids, Selection and Application  
Jeffrey D. Silliman  
Publicado por Society of Manufacturing Engineers  
1992
  
- 10- Manual de capacitación  
De Young  
Phase III Kennametal product, Kennametal  
1995
  
- 11- Sumitomo Electric  
Catálogo general de productos de Herramientas de corte.  
1995
  
- 12- Corokey  
Catálogo de selección de herramientas de corte  
1996
  
- 13- Castrol's Liaison with the tooling industry  
Castrol  
Robert Nell  
1996

- 14- Rimas MAPAL, herramientas de precisión  
Catálogo de información técnica  
1996
  
- 15- Kienninger. Cortadores con insertos de diamante  
Catálogo de información técnica  
1996
  
- 16- Hertel, herramientas de precisión  
Catálogo de información técnica  
1996
  
- 17- Gühring, herramientas de precisión  
Catálogo técnico  
1996
  
- 18- JEL, herramientas de precisión  
Catálogo técnico  
1998
  
- 19- Visitas a exposición de maquinaria  
Chicago USA.  
WTC, México  
Exhibimex, México  
Palacio de los deportes.  
Planta de capacitación Iscar, Arlington USA  
Exposición de maquinaria CNC y herramientas, Alemania, Dürsseldorf.