

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE MAQUINADO PARA
ALEACIONES DE ALUMINIO SILICIO.**

TESIS

Para obtener el Grado de Maestría en Ciencias de la
Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

PRESENTA

ING. ENEDELY SILERIO BENAVIDES

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L.

Noviembre 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE MAQUINADO PARA
ALEACIONES DE ALUMINIO SILICIO.**

TESIS

Para obtener el Grado de Maestría en Ciencias de la
Ingeniería Mecánica con Especialidad en Materiales

PRESENTA

ING. ENEDELY SILERIO BENAVIDES

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L.

Noviembre 2012

DEDICATORIA

Primeramente a **Dios** por guiarme en el camino y permitirme subir con éxito un peldaño más en mi carrera profesional y aprender cosas nuevas cada día.

Y a **todos aquellos** que aportaron un granito de arena en esta tesis de maestría, tendiéndome la mano, apoyándome a realizar este trabajo, a ser una mejor profesionista y a crecer fuerte como persona a través de sus palabras y conocimientos, con sus sabios consejos, su paciencia y cariño, estando a lo largo del camino junto a mí y hasta el final, en esta etapa tan importante de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Juana María y Rubén, por todo el amor, el apoyo brindado para salir adelante en las tempestades, forjando mi carácter personal y académico, por ser mi ejemplo a seguir y motivarme cada día de mi vida.

A mis hermanos Rubby, Rubén y Robyn, por estar siempre cuando los he necesitado para brindarme su amor, compañía, ayuda y consejos.

A mi Abuelita Rosalinda, por su amor, sus sabios consejos su gran apoyo y ejemplo, por ser una gran mujer y siempre enseñarme cosas buenas en la vida.

A toda mi familia por acompañarme a lo largo de este camino.

A mis amigas, Samantha, Vero, Claudia, Itzel, Yaneth, y muchas otras que faltan por mencionar, por brindarme su valiosísima amistad, compañía y consejos y por todos los buenos momentos que me regalaron en este tiempo motivándome para la realización de este proyecto.

A el Dr. Alberto Pérez, por creer en mí, he invitarme a colaborar en los proyectos de investigación, transmitirme sus conocimientos, que me han servido para conocer el mundo de la investigación, ser paciente y un buen asesor de tesis, brindándome su apoyo y amistad en este tiempo.

A mis co-asesores de tesis el Dr. Ignacio Álvarez y al Dr. Alejandro González, por todas sus enseñanzas, sus buenos consejos y valiosa asesoría para el desarrollo de este proyecto.

A la empresa NEMAK por el soporte brindado en este proyecto.

A el Dr. José Talamates, Director de Investigación y Desarrollo de la empresa NEMAK, por todo su apoyo y contribución.

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico y brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, en especial al Doctorado de Ingeniería de Materiales por aceptarme y permitirme incorporarme a realizar mis estudios de maestría, a todos los maestros y compañeros de los cuales obtuve grandes conocimientos.

A todos aquellos que aportaron algo en el transcurso de este camino, que me brindaron su amistad y me guardan aprecio.

Prólogo

Uno de los principales retos de la industria nacional, principalmente del sector automotriz es el de reducir los gases contaminantes provenientes de la operación de los motores de combustión interna. Un gran esfuerzo se está realizando para hacer los automóviles más eficientes. Esto incluye, reducir el peso de los automóviles y diseñar motores más eficientes energéticamente. Para lograr esto, se están desarrollando cada día nuevos materiales o se están mejorando los existentes. Así tenemos aceros de mayor resistencia para utilizar elementos estructurales de menor peso. Utilización de aleaciones de aluminio en partes estructurales, suspensión y del motor como son el monoblock y la cabeza. Otras alternativas es el uso de motores eléctricos o híbridos. En el tema de nuevas aleaciones de aluminio, hay un gran interés por parte de los constructores de automóviles y de los productores de piezas fundidas de aluminio en desarrollar un motor “sin camisa” o “linerless” por su nombre en inglés. Esto ha llevado a la generación de una nueva familia de “super-aleaciones” base aluminio con alto contenido de silicio. El manejo metalúrgico de estas aleaciones se ha alcanzado recientemente en empresas de nivel mundial como es NEMAK. Las propiedades tribológicas de dichas aleaciones también ya se han caracterizado en forma conjunta entre NEMAK y la FIME de la UANL, dando resultados esperanzadores en su posible uso a corto plazo. Finalmente, queda aún el tema de la maquinabilidad de estas nuevas “super-aleaciones” base aluminio. Es donde, precisamente, se establece el presente trabajo de la Ing. Enedely Silerio Benavides, quien desde una perspectiva metodológica y científica, propone un diseño conceptual para evaluar la maquinabilidad de estas aleaciones, acercándonos un paso más, pero muy significativo, para ver a corto plazo estos motores en líneas de producción de automóviles comerciales. Y a su vez, acercándonos más a tener motores de combustión interna con mucho menor impacto ambiental, para beneficio de nuestro planeta y de toda la humanidad. Es el trabajo pionero de la Ing. Enedely Silerio quien aporta este significativo avance.

Alberto Pérez Unzueta.

Cd. Universitaria, Noviembre 2012.

Contenido

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
Prólogo	iii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo.-	9
1.2 Hipótesis-.	9
1.3 Alcance.-	9
1.4 Limitaciones	10
1.5-Estado del Arte.....	10
Referencias	13
CAPÍTULO 2.....	15
ALEACIONES DE ALUMINIO	15
2.1 Aluminio metálico y sus propiedades	16
2.2 Obtención del aluminio	17
2.3 Clasificación de las aleaciones de aluminio	21
2.4 Aleaciones Aluminio- Silicio para fundición	27
2.5 Principales tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio	31
2.6 Aplicaciones del aluminio en el área automotriz.....	34
Referencias	37

CAPÍTULO 3	39
MAQUINADO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO	39
3.1 Introducción a la teoría del maquinado.....	40
3.2 Fresado	44
3.3 Parámetros de maquinado	46
3.4 Herramientas de maquinado para fresadora	51
3.5 Geometría y ángulos para las herramientas de maquinado	53
3.6 Materiales para herramientas de maquinado	66
3.7 Fluidos y refrigerantes para maquinado	72
3.7.1 Lubricación.....	77
3.7.2 Enfriamiento	78
3.7.3 Características Químicas de los Fluidos de Corte	79
3.7.4 Aceites de corte.....	80
3.7.5 Fluidos sintéticos.....	80
3.7.6 Soluciones base de agua.....	81
3.7.7 Emulsiones.....	81
3.7.7.1 Estabilidad de las Emulsiones.....	82
3.7.8 Aditivos.....	83
3.7.8.1 Aditivos para soportar Presión Extrema (PE).....	83
3.7.8.2 Detergentes.....	84
3.7.8.3 Aditivos para prevenir la formación de niebla.....	84

3.7.8.4 Aditivos Antiespumantes.	84
3.7.8.5 Filtros de olor.	84
3.7.8.6 Inhibidores de la corrosión.....	85
3.7.8.7 Colorantes.	85
3.7.8.8 Agentes antimicrobianos.	85
3.8 Selección de fluidos de corte para metales	86
3.8.1 Características de los fluidos de corte.....	86
3.8.2 Material de la pieza de trabajo.	87
3.8.2.1 Aceros inoxidables.....	87
3.8.2.2 Aleaciones de aluminio.....	87
3.8.2.3 Aleaciones de titanio.....	88
3.8.3 Operaciones de Maquinado	88
3.9 Métodos de Control y Prueba de los Fluidos de Corte	89
3.9.1 Viscosidad.....	91
3.9.2 Concentración.	91
3.9.3 Estabilidad de la emulsión.....	93
3.9.4 Formación de Espuma	94
3.9.5 Partículas contaminantes.....	95
3.9.6 Concentración de iones hidrógeno	95
3.9.7 Corrosión.....	95
3.9.8 Pruebas Biológicas.....	96

3.9.9 Calidad del Agua.....	97
3.9.10 Residuales.	98
3.9.11 Conductividad Eléctrica.....	98
3.10 Rebaba.....	99
Referencias	110
CAPÍTULO 4.....	113
DISEÑO CONCEPTUAL DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE MAQUINADO	113
4.1 Conceptualización	114
4.2 Componentes y funciones del dispositivo.....	124
4.3 Información a generar	127
4.4 Correlación con los parámetros microestructurales.	130
Referencias	131

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El uso del aluminio y sus aleaciones se ha incrementado con éxito en los últimos años, sustituyendo el hierro y el acero en diversas aplicaciones. El aluminio es un metal único, fuerte, durable, flexible, impermeable, ligero, resistente a la corrosión y reciclable al 100 por ciento. Es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y representa cerca del 7.3% en masa de la misma. Existe en diversas combinaciones muy estables con otros elementos, especialmente formando silicatos y óxidos. Se ha convertido en el segundo metal más utilizado después del hierro. La producción anual de aluminio primario en el año 2010, fue alrededor de 44.5 millones de toneladas y la producción de aluminio reciclado fue alrededor de 16 millones de toneladas. En base al constante incremento en la demanda de aluminio en los últimos años, se espera que la producción mundial alcance 55 millones de toneladas por año, hasta el año 2015.

El aluminio es un material extraordinariamente versátil debido a la gama de formas que puede tomar en función del procedimiento de manufactura utilizado, ya sea por fundición, forja, laminación, extrusión o pulvimetalurgia, entre otros, además de la variedad de acabados superficiales disponibles como

son los diferentes recubrimientos, entre ellos los diversos tipos de anodizado y pulido. La resistencia que presenta, combinada con su baja densidad, lo hacen un material ideal para aplicaciones para transporte aéreo, marítimo o terrestre, y en el envasado de diferentes productos, principalmente alimentos y bebidas.

La actual preocupación mundial por el cambio climático ha forzado a muchos países a revisar sus políticas y legislación ambiental. Por su parte diferentes empresas hacen un esfuerzo en mejorar sus prácticas industriales a fin de disminuir la emanación de gases tipo invernadero (GHG en inglés). En este contexto, la industria automotriz encuentra una importante área de oportunidades. Por un lado se busca eficientizar el desempeño energético de los motores de combustión interna a fin de que consuman menos combustible y de esta manera reducir la emanación de gases de la combustión. Para lo anterior, se busca cada vez más, reducir el peso de los automóviles utilizando materiales más ligeros y eficientizar la transferencia de calor de los motores con el uso de materiales con mejor conductividad térmica sin perder sus propiedades mecánicas. Con este reto tecnológico, muchas piezas del motor de combustión interna que tradicionalmente se fabricaban a partir de piezas fundidas de acero o de hierro, están siendo sustituidas por fundiciones de aleaciones de aluminio. Las aleaciones de aluminio presentan una densidad mucho menor que las aleaciones ferrosas y una mayor transferencia de calor, haciendo así los motores más ligeros, más eficientes, de mejor rendimiento y desempeño energético. Esto trae como beneficio directo al usuario del automóvil un menor consumo de combustible y un beneficio social que es el de reducir los gases tipo invernadero.

Es precisamente el desarrollo de nuevas aleaciones de aluminio lo que ha permitido ir sustituyendo las pesadas fundiciones de hierro por piezas más ligeras. Este desarrollo es continuo y es de gran importancia desde el punto de

vista científico, tecnológico, ecológico y económico. El uso de componentes de aluminio ligero en un vehículo puede ahorrar entre seis y doce veces más energía. Además, un kilogramo de aluminio, usado para reemplazar los materiales más pesados en un automóvil o camioneta, tiene el potencial de eliminar 20kg de CO₂ durante la vida útil del vehículo. Para los demás vehículos, tales como trenes, barcos y aviones, el ahorro podría ser aún mayor [1].

La industria global del aluminio ha desarrollado una estrategia voluntaria de cuatro puntos para afrontar los retos del cambio climático, que abarca el ciclo completo de la producción aluminio, su uso primario, el reciclaje y la reutilización [1]:

1. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de la producción de aluminio.
2. Aumentar la eficiencia energética en la producción de aluminio.
3. Maximizar el reciclado y reutilización.
4. Promover la reducción de peso de los vehículos.

La industria automotriz es uno de los sectores más importantes en la industria moderna. Los países con una gran industria manufacturera automotriz contribuyen con una porción elevada en el PIB (Producto Interno Bruto). Lo anterior, aunado al uso masivo de este sistema individual de transporte, ha provocado que este sector se convierta en un factor económico importante [2].

Las aleaciones de Al-Si son ampliamente usadas en la industria automotriz, en estructuras aeroespaciales y aplicaciones militares. Esto debido a sus buenas propiedades mecánicas, su bajo peso, buena soldabilidad, buena conductividad térmica, relativamente alta resistencia a alta temperatura, excelente resistencia a la corrosión, así como una excelente fluidez al ser vaciadas en moldes (castabilidad) [3].

El uso de las aleaciones de aluminio se ha incrementado cada vez más debido a la buena combinación de sus propiedades. Entre las muchas aplicaciones industriales, se encuentran la producción de envases o contenedores de alimentos por ser un elemento no tóxico; en el sector de la construcción se utiliza por su buena ductilidad; para la transmisión de energía eléctrica-electrónica por ser un material con alta conductividad eléctrica y es no-ferromagnético; por ser un material ligero es utilizado en la industria del transporte, además en la fabricación de maquinaria y utensilios domésticos. Uno de los usos más destacados en la industria, es en la fabricación de piezas automotrices, como son algunos componentes de motor. El interés del presente trabajo se enfoca a las piezas denominadas bloques (monoblock) y cabezas de motor. Estos son dos ejemplos claros de nuevas aplicaciones de aleaciones de aluminio que se han posicionado fuertemente en esta industria. Cada día, se buscan tener motores más ligeros, más eficientes, con mayor potencia y menor consumo de combustible.

En busca de satisfacer lo anterior las grandes empresas automotrices, entre ellas, la empresa mexicana Nemak S.A de C.V., están desarrollando nuevas aleaciones de aluminio que satisfagan los nuevos diseños de motores de combustión interna y de los motores híbridos, ver figura 1. Estos nuevos diseños requieren de aleaciones de mayor resistencia y alto desempeño, por lo que la industria de la fundición de aluminio está trabajando con nuevas aleaciones o mejorando las ya existentes. Una manera de mejorar las propiedades mecánicas es por medio del control microestructural de las aleaciones, utilizando modificadores, los cuales cambian la morfología de las fases o por medio de la disminución del espaciado interdendrítico secundario. Otra manera es por medio de la aplicación de tratamientos térmicos para mejorar dichas propiedades mecánicas tales como resistencia máxima, punto de cedencia, ductilidad, tenacidad, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste. Así mismo, se están desarrollando nuevas aleaciones, principalmente aleaciones híper-eutécticas. Estos nuevos desarrollos han fructificado en una nueva gama de familias de aleaciones de

aluminio, sin embargo, aún falta dilucidar sobre la maquinabilidad de estas nuevas aleaciones.

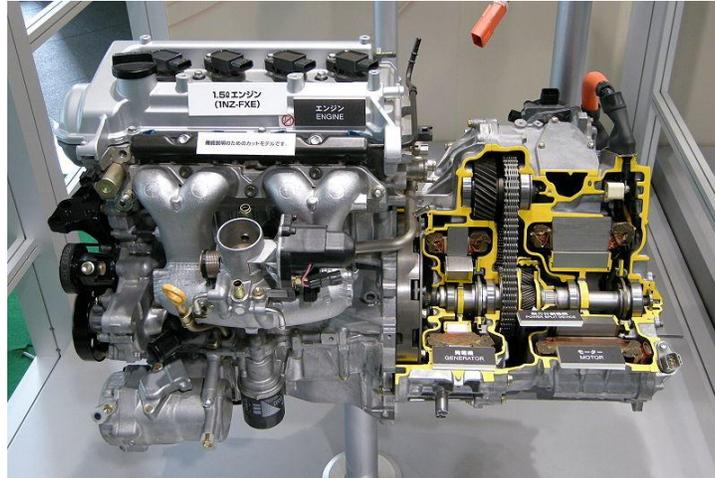


Figura 1.1. Motor automotriz híbrido. A la izquierda un motor de combustión interna. A la derecha un motor eléctrico y la transmisión [10]

Nemak ha patentado una nueva aleación híper-eutéctica (patente US2010/ 0288461) 13-14Si, 2.3-2.7Cu, con modificación en la microestructura, la cual tiene buenas propiedades mecánicas, tribológicas y de castabilidad [4]. Pero la maquinabilidad aún tiene que ser evaluada. Uno de los objetivos del presente estudio es diseñar un dispositivo experimental de maquinado para aleaciones Al-Si modificadas, con el fin de determinar los parámetros óptimos de maquinado, en función de la aleación, microestructura y dureza.

Maquinado es un proceso de fabricación diseñado para eliminar el material no deseado por medio de corte, generalmente eliminándolo en forma de viruta, de una pieza de trabajo [5]. Es una operación importante en la producción de monobloques y cabezas de motor. Un porcentaje alto del valor agregado de la piezas está directamente ligado a los costes de maquinado.

De los diferentes tipos de maquinado de piezas para motor, el fresado es uno de los más importantes. En este proceso de mecanizado, el metal se elimina mediante una rotación de herramientas con múltiples filos de corte; cada filo o diente elimina una pequeña cantidad de metal con cada revolución del husillo. Se utiliza para obtener piezas de diversas formas y dimensiones [6,7].

El fresado es una operación de alto costo en la producción de altos volúmenes, ya que cuando hay una ruptura de herramienta se pueden producir paros en la línea, bajando la velocidad de producción o cuando se desgasta la herramienta los productos tienen menor calidad o deficiente acabado superficial. Estos problemas pueden generar grandes pérdidas económicas y es cuando nace la necesidad de mejorar e incrementar la productividad en esta parte del proceso de manufactura de los motores de combustión interna. Por otra parte, es normal que en un gran número de aleaciones metálicas, al mejorar las propiedades mecánicas casi siempre la maquinabilidad de las mismas se vea afectada. De aquí la importancia de evaluar, predecir y determinar los parámetros de maquinabilidad de las nuevas aleaciones fundidas de aluminio que se están desarrollando en la actualidad con mejores propiedades mecánicas para la producción de monobloques y cabezas para motores de combustión interna, entre ellas las aleaciones de Aluminio-Silicio híper-eutécticas modificadas.

El uso de estas nuevas aleaciones de aluminio para la fabricación de componentes de motor, piezas de suspensión y piezas de transmisión, entre otras, ha traído los siguientes beneficios:

- reducción en el peso del vehículo;
- reducción del uso de combustible;
- reducción de la emisión de contaminantes;
- reducción en el ruido del motor;
- reducción de las vibraciones, y

- reducción de oxidación y corrosión comparada con aleaciones base hierro [8].

El aumento de las propiedades mecánicas de las aleaciones Al-Si dependen de la interacción entre la composición química; y (a) las características microestructurales desarrolladas durante la solidificación, (b) los métodos de tratamiento térmico y (c) los procesos de deformación, para el caso de aleaciones forjadas/laminadas [8]. Es importante mencionar que la interacción del filo de la herramienta con las diferentes fases de la microestructura va a ser diferente cuando se tiene una aleación hipo-eutéctica o una híper-eutéctica.

En cuanto a la microestructura, se va a tener diferente tamaño y distribución de las diferentes fases. En una aleación hipo-eutéctica, el silicio está formando la fase eutéctica y no se tiene silicio primario. En las aleaciones híper-eutéticas se tienen granos o cristales de silicio primario que afectan drásticamente la maquinabilidad. Las mejores condiciones de maquinado se obtienen mediante una microestructura completamente eutéctica, libre de fase alfa rica en aluminio y libre de fase silicio primario. En las aleaciones híper-eutéticas, entre más grande sea el tamaño de grano de los cristales de silicio primario, menor será la maquinabilidad de la aleación. Esto debido a que los granos de silicio primario actúan como partículas duras y abrasivas, aumentando el desgaste y ruptura de las herramientas [11,12]. A estas aleaciones se les aplican modificadores para hacer que la microestructura presente un grano más fino y facilitar el corte cuando se están mecanizando.

El uso de Silicio como elemento principal de aleación en el aluminio ofrece excelentes propiedades como:

- buena castabilidad
- buena conductividad térmica

- excelente resistencia a la corrosión,
- retención satisfactoria de propiedades físicas y mecánicas a altas temperaturas.

El potencial de uso de las aleaciones de aluminio como material para disminuir el peso de los vehículos automotrices se hace evidente cuando se considera su peso específico (2.7 gr/cm^3), que es mucho menor a la del hierro (7.8 g/cm^3) y a la del cobre (8.9 g/cm^3). Por supuesto, esta es una visión simplificada, ya que los criterios específicos de la aplicación de diseño y rendimiento tienen que ser considerados para cada componente del vehículo. Dichos criterios están relacionados con la métrica del rendimiento específico, tales como resistencia mecánica y rigidez, así como el peso. Por lo tanto, cada componente debe ser individualmente evaluado en base a todos los criterios de rendimiento deseados [9].

La combinación de ligereza, resistencia y conformabilidad hacen del aluminio el material ideal para cualquier aplicación de transporte. Al evaluar el maquinado, la inversión inicial en materia de energía se compensa con creces en el ahorro de combustible y las ganancias durante el reciclado de la mayoría de los vehículos.

El paso crucial es tener un diseño integrado al enfoque de ingeniería, teniendo en cuenta las propiedades específicas de las aleaciones de aluminio y las calidades de los productos semielaborados. El conocimiento íntimo de las características del material, incluyendo el comportamiento de la aleación, permite conocer los parámetros óptimos de maquinado que se necesitarán en cada caso específico, esto con el fin de desarrollar más rápido los productos basados en el diseño asistido por computadora y los métodos de ingeniería. La fabricación de un dispositivo de maquinado que dé a conocer parámetros específicos de cada aleación, podrá asegurar una producción eficiente y productos con alta calidad. Lo anterior traerá beneficios en la economía de los procesos.

1.1 Objetivo.-

Desarrollar una metodología de análisis sistemático de maquinado, específicamente de la operación de fresado para aleaciones de Aluminio-Silicio modificadas, y obtener los parámetros óptimos en función de la aleación, microestructura y dureza.

1.2 Hipótesis.-

Conociendo la cantidad, morfología y propiedades físicas de las fases presentes en las aleaciones de Aluminio-Silicio modificadas, se podrán proponer los parámetros óptimos de maquinado.

1.3 Alcance.-

El alcance de este estudio es diseñar un dispositivo que permita evaluar las condiciones de maquinado, y a futuro crear la tecnología de maquinado que permita establecer los mejores parámetros del mismo en función del tipo de aleación, microestructura y dureza. Este proceso consiste en:

1. Desarrollar una mesa instrumentada de maquinado en dos ejes.
2. Diseñar la metodología sistemática de maquinado de este tipo de aleaciones.
3. Desarrollar la tecnología eficiente de maquinado para las aleaciones Al-Si modificadas.

1.4 Limitaciones

El dispositivo propuesto en el presente estudio estará diseñado únicamente para el proceso de fresado y con un solo filo de corte en la herramienta, con el propósito de discretizar el proceso. El dispositivo que se propone permitirá determinar los parámetros de corte de las aleaciones de Al-Si, entre ellas las hipo-eutécticas y eutécticas, sin embargo, las de mayor interés en el presente estudio son en las nuevas aleaciones híper-eutécticas con modificación en la microestructura, ya que el objetivo principal es determinar los parámetros óptimos de fresado en función de este tipo de aleaciones, su microestructura y dureza.

1.5-Estado del Arte

El maquinado se ha convertido en un tema de investigación importante dentro de la industria automotriz. Existen dos procesos principales para modificar la forma de un objeto. Uno es por medio de la conformación mecánica donde se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas y producir la geometría requerida. La otra es por medio del maquinado donde se elimina el material sobrante por medio de operaciones de corte hasta llegar a la forma, dimensiones y acabados requeridos. Los costos involucrados en estos procesos son importantes para la competitividad de las empresas, de ahí la importancia de investigar y desarrollar los procedimientos óptimos de cada uno de estos procesos [13]. Independiente del proceso de manufactura, y aun cuando la opción de conformado mecánico no sea posible, tal como es el caso de monoblocks y cabezas de motor, siempre se requerirá de un maquinado final de las piezas. Ante esta necesidad, existe una considerable cantidad de información del maquinado de aleaciones

tradicionales de aluminio, como son las aleaciones hipo-eutécticas, sin embargo, debido a su reciente desarrollo, poco se ha estudiado del maquinado de las aleaciones Al-Si híper-eutécticas. En el siguiente párrafo se sintetizan los estudios más recientes.

J.M. Dasc y colegas (et.al. en lo sucesivo) han estudiado recientemente la influencia de elementos de aleación para facilitar el maquinado en aleaciones de aluminio. Sin embargo, muchos de los elementos que facilitan el maquinado también tienen un efecto adverso en las propiedades mecánicas de las aleaciones [14]. Por su parte Xiao et.al. [15] han estudiado el maquinado de aleaciones de aluminio utilizando herramientas a base de diamante. Aunque sus resultados son prometedores, no se ha resuelto el problema de la adherencia del metal base en los filos de las herramientas. Las herramientas más comúnmente empleadas para el maquinado de las aleaciones de aluminio-silicio, tanto hipo-eutécticas como híper-eutécticas, son las herramientas a base de carburo de tungsteno [16]. Algunos investigadores como Zhang et.al. [17] han estudiado el efecto del maquinado en el desgaste de herramientas a base de aceros especiales altamente aleados o aceros alta velocidad (HSS). S. Valtierra et.al. [18] estudiaron los efectos de los parámetros microestructurales y de los tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio-silicio tipo A356 y A319 sobre las condiciones de maquinado. En general, en la literatura científica reciente, a pesar de que existe una gran cantidad de información sobre el maquinado de aleaciones base aluminio y de aleaciones aluminio-silicio hipo-eutécticas, existe muy poca y en algunas veces contradictoria información en cuanto al maquinado de aleaciones híper-eutécticas [19-20]. Lin, et. al. [21] han estudiado la maquinabilidad de compósitos formados por aleaciones de aluminio reforzadas con partículas de carburo de silicio. Estos investigadores encontraron una muy baja maquinabilidad conforme se incrementa la cantidad de SiC, proponiendo un enfoque completamente distinto al maquinado de dichos compósitos.

La maquinabilidad es un aspecto importante para poder plantear un proceso de corte eficiente. Un estudio de la evaluación de la maquinabilidad puede ser la base para tener mejor desempeño en la herramienta de corte, fluidos refrigerantes y optimización de los parámetros de maquinado.

Es esta última visión, en la cual los investigadores de la empresa Nematik, junto con los investigadores de la FIME-UANL han propuesto una investigación de la maquinabilidad de aleaciones aluminio-silicio híper-eutécticas con alta resistencia al desgaste [22]. De este nuevo enfoque surge el presente proyecto de investigación, el cual permitirá evaluar los materiales de trabajo, mejorar la productividad, minimizar el tiempo de producción e incrementar la eficiencia de los procesos de maquinado.

La importancia de esta investigación en la ciencia, consiste en poder correlacionar las propiedades mecánicas con los parámetros microestructurales de las diferentes aleaciones de aluminio y en los parámetros de transformación. Por su parte, la importancia tecnológica es satisfacer la necesidad industrial para desarrollar un procedimiento simple, sistemático, lógico y conveniente que permita a las empresas evaluar la maquinabilidad de sus materiales de trabajo de manera eficiente y efectiva. Finalmente, la importancia de este trabajo en la sociedad, es aportar conocimiento y tecnología para hacer que los motores de combustión interna sean más eficientes, utilicen menos energéticos y emanen menor cantidad de gases tipo invernadero, y de esta manera, reducir el uso de combustibles y afectar menos nuestro medio ambiente [23].

Referencias

- [1] *World Aluminium (Aluminium Applications)*. <http://www.world-aluminium.org/About+Aluminium/Applications+and+Products/Transportation/Automotive>). Consultada el 10-01, 2012.
- [2] *F. Morales-Rendón. Estudio de adhesividad entre una aleación de aluminio A319.0 y una camisa de aluminio base Al-Si-Cu-Mg para aplicaciones automotrices. Tesis M. C. Universidad Autónoma de Nuevo León. Junio 2003.*
- [3] *POLITEXT. Aleaciones ligeras. F.J Gil Mur, ed. C Aparicio, JM Manero, D Rodríguez, A Andrés, JM Arandés, y JA Planell. EDICIONS UPC. Primera edición: junio de 2001.*
- [4] *NEMAK. Private communication from Machining Process Dept.. Nematik, México. Enero 2012.*
- [5] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997.*
- [6] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997.*
- [7] *G. Castro. Técnicas Modernas de Mecanizado. Parte I. Facultad de Ingeniería. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2009.*
- [8] *G.H. Garza-Elizondo. Machining of Al-7-11%Si Casting Alloys: Role of Free Cutting Elements. M.E. Thesis. University of Quebec. Canada. August 2010.*
- [9] *The Future Moves with Aluminium*
(<http://transport.world-aluminium.org/index.php?id=35&L=0>)
- [10] <http://toyotacarsreview.com/image/30cbe9e5>
- [11] *A. Pérez-Unzueta. Curso de Materiales para Diseño. FIME UANL México. 2010.*
- [12] *A. Pérez-Unzueta. Curso de Metales No-Ferrosos. FIME UANL México. 2011.*
- [13] *Dieter, George. Machining of Metals. Mechanical Metallurgy. s.l. : Mc Graw Hill Book Company, 1988, págs. 679-705.*

- [14] J.M. Dasc, C.C. Ang, C.A. Wong, R.A. Waldo, D. Chester, Y.T. Cheng, B.R. Powell, A.M. Weiner and E. Konca. *The effect of free-machining elements on dry machining of B319 aluminum alloy. Journal of Materials Processing Technology. Volume 209, Issue 10, 1 June 2009, Pages 4638-4644*
- [15] X. Xiao, L.C. Lev and M.J. Lukitsch. *Material transfer during machining of aluminum alloys with polycrystalline diamond cutting tools. Journal of Materials Processing Technology. Volume 209, Issue 17, Aug. 2009.Pp. 5760-5765*
- [16] NEMAK. *Comunicación privada. Nematik, Monterrey, México. Enero 2012.*
- [17] M. Z. Zhang, Y. B. Liu and H. Zhou. *Wear mechanism maps of uncoated HSS tools drilling die-cast aluminum alloy. Tribology International Volume 34, Issue 11, Nov. 2001, Pp 727-731.*
- [18] M. Tash, F.H. Samuel, F. Mucciardi, H.W. Doty, S. Valtierra. *Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminum alloys. Materials Science and Engineering A 434 (2006) 207–217.*
- [19] W. König and D. Erinski. *Machining and Machinability of Aluminium Cast Alloys. CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 32, Issue 2, 1983, Pages 535-540*
- [20] Milton C. Shaw. *Metal Cutting Principles. Second Edition. Jun 2004.*
- [21] J.T.Lin, B.Bhattacharyya, C.Lane. *Machinability of a silicon carbide reinforced aluminium metal matrix composite. Wear 181-183 (1995) pp. 883-888.*
- [22] A. Pérez y J. Talamantes. *Propuesta de estudio para evaluar la maquinabilidad de aleaciones Al-Si híper-eutécticas utilizadas para la fabricación de componentes de motor automotriz. Comunicación privada FIME-NEMAK. Agosto 2010.*
- [23] *Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method. Rao, V. 2006, International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 28, págs. 221-227.*

CAPÍTULO 2

ALEACIONES DE ALUMINIO

El aluminio es un metal no ferroso que reúne una serie de excelentes propiedades mecánicas, de ahí su amplio uso en la industria [1]. La demanda que ha tenido en los últimos años va incrementándose día con día, sustituyendo otros materiales más pesados, como son algunas aleaciones ferrosas. Las aleaciones de aluminio presentan mejor resistencia mecánica, incluso a relativamente altas temperaturas. El aluminio es un material ligero y es cien por ciento reciclable, lo que lo hace aún más atractivo en cuanto a ahorros de energía.

En éste Capítulo, se presentará la clasificación de las aleaciones de aluminio y como mejoran sus propiedades al agregar ciertos elementos de aleación; también, se presentarán los principales tratamientos térmicos utilizados. Se hará especial énfasis en la aplicación de estas aleaciones en la industria automotriz y como se han convertido en aleaciones clave para disminuir los contaminantes, al mejorar el rendimiento y potencia de los motores de combustión interna.

2.1 Aluminio metálico y sus propiedades

El aluminio puede ser muy resistente en comparación con otros materiales al considerar la resistencia por unidad de masa. El aluminio es casi tres veces más ligero que el hierro, es más dúctil y maleable, lo cual lo hace muy atractivo en ingeniería mecánica. El aluminio tiene baja densidad, $2,700 \text{ kg/m}^3$, y alta resistencia a la corrosión. En estado puro tiene un límite de resistencia a la tracción de 160 a 200 MPa. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar su resistencia mecánica hasta 690 MPa. Es un excelente conductor eléctrico, su conductividad eléctrica está entre 34 y 38 ($\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$) y su conductividad térmica varía entre 80 a 230 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{K})$. Se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Las temperaturas de fusión y ebullición son de 660°C y $2,467^\circ\text{C}$, respectivamente. No se altera en contacto con el aire ni se descompone en presencia de agua, debido a que su superficie queda recubierta por una fina capa de óxido que lo protege del medio. Sin embargo, su reactividad con otros elementos es elevada: al entrar en contacto con oxígeno produce una reacción de combustión que origina una gran cantidad de calor, y al combinarse con halógenos y azufre da lugar a la formación de haluros y sulfuros.

La buena resistencia mecánica de algunas de sus aleaciones, incluso a altas temperaturas y la buena resistencia a la corrosión gracias a la película de alúmina que se forma en su superficie de forma espontánea protegiéndolo, hace que esté llegando a sustituir a aleaciones de titanio en la industria aeronáutica, donde la ligereza unida a la resistencia mecánica son factores de gran importancia.

Su baja temperatura de fusión unida a su elevada temperatura de ebullición hace al aluminio idóneo para la fundición. El aluminio presenta una estructura cristalina tipo CCC (FCC en inglés) y no sufre cambios alotrópicos, lo que le confiere una alta plasticidad, aunque las propiedades mecánicas varían

enormemente según sean los elementos aleantes y los tratamientos termomecánicos a los que se someta el aluminio.

2.2 Obtención del aluminio

El aluminio es un metal no ferromagnético, se encuentra presente en las rocas, la vegetación y los animales. En estado natural, se encuentra formando compuestos químicos con otros elementos, principalmente como óxido o silicatos. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido como bauxita, este material se refina para obtener alúmina y finalmente de ésta, por un proceso de electrólisis, se obtiene el aluminio. La bauxita es el nombre del mineral que se explota para obtener alúmina, este contiene un mineral rico en aluminio, entre un 20% y un 30% en masa, contra al 10% ó 20% de los silicatos de aluminio existentes en arcillas. El aluminio también se encuentra mezclado con otros compuestos formando caolinita, cuarzo, óxidos de hierro y titania. El aluminio se presenta en varias formas hidróxidadas como la gibsita $\text{Al}(\text{OH})_3$, la bohemita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ y la diasporita AlOOH [2,4].

Para producir una tonelada de aluminio se requieren de cinco toneladas de bauxita de las que se obtienen dos toneladas de alúmina con un consumo de energía de 17 MWh. Lo primero que se busca es transformar la bauxita a alúmina (Al_2O_3) mediante el proceso de refinación Bayer y después obtener aluminio metálico mediante electrólisis. El proceso tipo Bayer se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos.

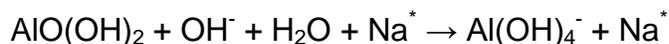
El aluminio primario es uno de los metales más costosos en obtener. En la producción de aluminio metálico, del 25% al 30% del costo total es utilizado para cubrir el costo de energía. El aluminio primario puede ser utilizado como metal comercialmente puro o puede alearse con otros elementos para incrementar ciertas propiedades. Una parte importante de la producción mundial

de aluminio es por medio del reciclado de chatarras. Esto ha aumentado la producción total en un 20% . aproximadamente, en la actualidad

Los principales yacimientos de bauxita se localizan en Brasil, el Caribe, África, Rusia y Australia. Los países que proporcionan la mejor calidad de alúmina son Canadá y Australia. En estos países la alúmina contiene 0.04% Fe mientras que la que proviene de Brasil contiene 0.1%. La calidad depende del contenido de impurezas de hierro, entre menor sea el contenido de impurezas mejor será la calidad.

Existen dos pasos para obtener el aluminio. El primero es por medio del método químico desarrollado por el científico austríaco Karl Joseph Bayer que consiste en la extracción de la bauxita. En este proceso se obtiene el óxido de aluminio por medio de una serie de reacciones químicas, después de este método la alúmina es descompuesta en oxígeno y aluminio metálico con corriente continua mediante el proceso de electrólisis [2, 3, 4].

El método de Bayer se inicia con el triturado de la bauxita. Se hace un lavado con una solución de hidróxido de sodio a alta presión y temperatura, después la sosa disuelve los compuestos del aluminio, estos se colocan en un medio fuertemente básico, hidratándose:



La solución del aluminio se enfría para luego recristalizar el hidróxido de aluminio (gibbsite) y separarlo de la sosa, que se recupera para su uso posterior.

Seguido, se calcina el hidróxido de aluminio a temperaturas cercanas a 1,000°C, para liberar el agua cristalina y obtener la alúmina pura.



El óxido de aluminio obtenido de esta manera tiene un punto de fusión muy alto, alrededor de 2,000°C, de modo que no puede someterse a un proceso de electrolisis. Para contrarrestar este inconveniente se disuelve en un baño de criolita, obteniendo una mezcla eutéctica con un punto de fusión cerca de 900°C. Lo que permite llevar a cabo la electrólisis, la cual se realiza sumergiendo la bauxita en cubas especiales con electrodos de carbono (tanto el ánodo como el cátodo), en forma horizontal.

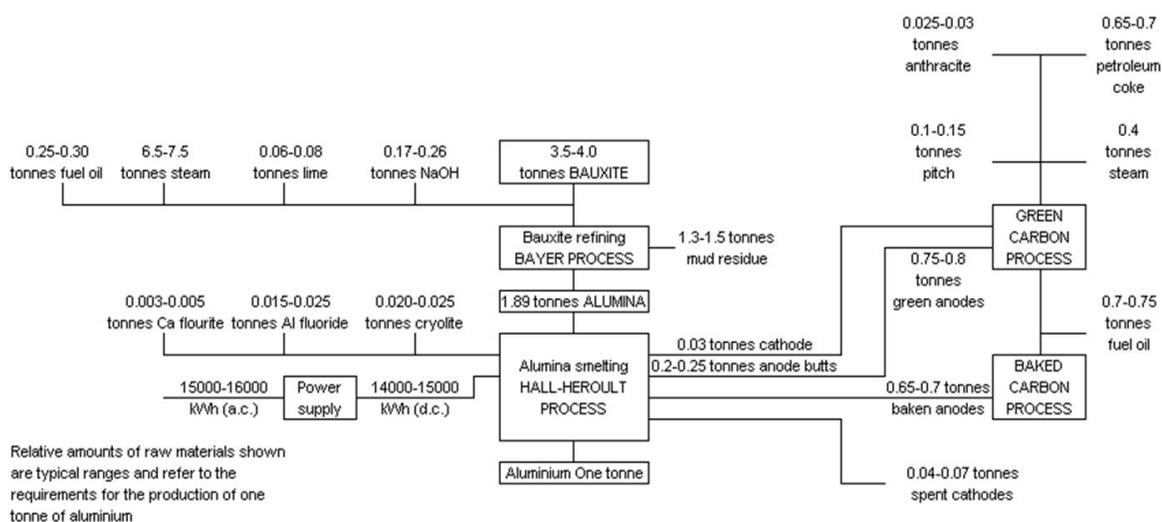


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de reducción [17].

Cabe mencionar que cinco toneladas de bauxita producen dos toneladas de alúmina y finalmente se obtiene una tonelada de aluminio. Cada tonelada de aluminio requiere entre 17 y 20 MWh de energía para su producción y consume durante el proceso 460 kg de carbono. Como ya se mencionó antes, de un 25% a un 30% del precio final del producto representa el costo de energía, convirtiendo al aluminio en uno de los metales más caros de obtener. Sin embargo, esta cantidad de energía se reduce hasta un estimado 95% por medio del proceso de reciclaje de chatarra, motivando que la industria lo considere como un valor agregado a la hora de eficientar los procesos y en los actuales programas de ahorro de energía. De hecho, se están buscando procesos alternativos menos costosos que el proceso electrolítico. El aluminio obtenido tiene una pureza del 99,5% al 99,9%, siendo las impurezas formadas por compuestos de hierro y silicio principalmente. El aluminio pasa de las cubas al horno donde es purificado mediante la adición de un fundente y se realiza la adición de los elementos aleantes específicos para cada tipo de aleación. Después de esto se vierte en moldes o lingoteras [2,3,4,20].

El material para ser reciclado es meticulosamente recolectado y clasificado por tipos de aleación por todas las compañías de aluminio. A diferencia de otros metales, el aluminio de desecho tiene un valor significativo y un valor intrínseco por unidad de peso. La tasa de reciclaje para aplicaciones de construcción y transporte va desde el 60 al 90% del total producido [20].

El aluminio es el único material de empaque que cubre su costo de recolección, re-proceso y traslado a los centros de reciclaje. La industria del aluminio está trabajando con los fabricantes de automóviles para permitir que los vehículos con componentes de aluminio sean fácilmente desmantelados y que los desechos sean clasificados y reutilizados para producir partes nuevas idénticas. En la mayoría de otros proyectos de reciclaje, los desechos de material son rara vez reutilizados para su misma aplicación, siendo el material re-procesado a bienes o productos de menor requerimiento de calidad.

2.3 Clasificación de las aleaciones de aluminio

El aluminio puro es un metal suave, blanco, de peso ligero y poco resistente a la tracción. Para mejorar estas propiedades mecánicas se combina con otros elementos como: silicio, cromo, tungsteno, manganeso, níquel, zinc, cobre, magnesio, titanio, circonio, hierro, litio, estaño y boro. Algunos de estos ayudan a las aleaciones a producir mejores propiedades específicas que se pueden aplicar para diferentes propósitos. Actualmente las aleaciones de aluminio se clasifican, según la asociación del Aluminio en los Estados Unidos, en series, desde la 1xxx a la 9xxx, como se muestra en la tabla1 [5].

Tabla I. Clasificación de las aleaciones de aluminio					
Serie	Designación	Aleante principal	Aleante principal		Principales compuestos en la aleación
			CONFORMADAS #xxx	VACIADAS #xx.x	
1000	1xxx	99% al menos de aluminio	No aleadas	No aleadas	
2000	2xxx	Cobre (Cu)	Cu con manganeso	Cu con otros elementos	Al ₂ Cu - Al ₂ CuMg
3000	3xxx	Manganeso (Mn)	Mn	Si con Cu o Mg	Al ₆ Mn
4000	4xxx	Silicio (Si)	Si	Si	-
5000	5xxx	Magnesio (Mg)	Mg	Mg	Al ₃ Mg ₂
6000	6xxx	Magnesio (Mg) y Silicio (Si)	Mg y Si	Sin usar	Mg ₂ Si
7000	7xxx	Zinc (Zn)	Zn con Cu, Mg, Cr y Zr	Zn con Cu o Mg	MgZn ₂
8000	8xxx	Otros elementos	Con W, Li y otros misceláneos	W-	
9000	9xxx	Serie poco usual	Reservada para uso futuro	Sin usar	

Las aleaciones se clasifican según su composición química, según el proceso primario de manufactura y el tratamiento térmico aplicado. A través de esta clasificación podemos conocer el tipo de aleación, sus componentes principales y su dureza nominal. Las aleaciones trabajadas en frío, están conformadas por los grupos 1xxx, 3xxx, 4xxx y 5xxx. Durante el trabajo en frío, el metal se endurece (temple mecánico) y el proceso puede requerir de un tratamiento térmico intermedio (recocido) o uno final (estabilización).

En cambio las aleaciones trabajadas en caliente, son tratadas térmicamente, para mejorar sus propiedades, estos grupos son 2xxx, 6xxx y 7xxx. Durante el trabajo en caliente el metal mejora sus características metalúrgicas y mecánicas. Muchas de estas aleaciones son conformadas por extrusión y posterior tratamiento térmico. El nivel de tratamiento se denota mediante la letra **T** seguida de varias cifras, de las cuales la primera define la naturaleza del tratamiento. Por ejemplo **T3** es una aleación trabajada en frío y tratada térmicamente.

Serie 1xxx: Realmente no se trata de una aleación sino de aluminio con una pureza del 99.0% de Al, con presencia de pequeñas cantidades de impurezas de hierro, silicio, cobre o zinc. Estas impurezas son en cantidades menores al 0.1%. Generalmente estas aleaciones tienen excelente resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y eléctrica, bajas propiedades mecánicas, aunque se puede mejorar la resistencia por trabajo en frío. Los usos típicos de esta serie incluyen el equipo químico, reflectores, intercambiadores de calor, conductores eléctricos y aplicaciones arquitectónicas [6].

Serie 2xxx. En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Cu, aunque también se puede añadir Mg. Tiene como características una buena

relación dureza-peso, no tienen tan buena resistencia a la corrosión como la mayoría de las demás series. En cuanto a la primera característica, esta serie tiene que ser sometida a un Tratamiento Térmico (TT) de solubilidad y envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas alcanzando propiedades similares e inclusive superiores a algunos aceros bajo carbono. El efecto de los TT's es el aumento de la dureza y una reducción en la ductilidad. En lo referente a la resistencia a la corrosión, estas aleaciones generalmente son galvanizadas con aluminio de alta pureza o con aleaciones de la serie 6xxx para protegerlas de la corrosión y que no se produzca corrosión intergranular. La aplicación que se le da a estas aleaciones es generalmente donde sea necesaria una alta relación dureza-peso, por ejemplo en las ruedas de camiones y aviones; en partes de la suspensión para camiones; en fuselajes de avión, y en estructuras que requieran buena dureza a temperaturas superiores a 150 °C. Salvo la aleación 2219 esta familia de aleaciones tiene una baja soldabilidad pero un alto índice de maquinabilidad [7].

Serie 3xxx. En estas aleaciones el principal elemento aleante es el Mn, que refuerza a la matriz de aluminio y le da una resistencia a la tracción de 110 MPa. Generalmente esta serie no es adecuada para tratamiento térmico, sin embargo presentan hasta un 20% más de dureza que el aluminio puro [3]. Debido a que el manganeso solo puede añadirse de forma efectiva hasta en un 1.5%, solo hay pocas aleaciones en esta serie. Sin embargo las aleaciones 3003, 3004 y 3105 son muy usadas para fabricar componentes que requieran dureza media, como son latas para bebidas, utensilios de cocina, intercambiadores de calor, mobiliario, señales de tráfico, lámina para techos y otras aplicaciones arquitectónicas. Se utiliza para fabricar componentes con buen índice de mecanizado [7,8].

Serie 4xxx. En esta serie el principal elemento aleante es el Si que suele añadirse en cantidades medianamente elevadas (hasta 12%). El silicio baja el punto de fusión sin fragilizar, por esta razón esta serie se utiliza como elemento de soldadura. La mayoría de estas aleaciones no son tratables térmicamente pero sí son usadas para soldar otras aleaciones que son tratables térmicamente. Las aleaciones con un elevado nivel de Si pueden generar un amplio rango de colores que van desde el gris oscuro al negro cuando son sometidas a un acabado anódico por oxidación. Por esta razón son ampliamente usadas en aplicaciones arquitectónicas. La 4032 tiene un bajo coeficiente de expansión térmica y una alta resistencia al desgaste por lo que son utilizadas en la fabricación de pistones para motores [7,8].

Serie 5xxx. En esta serie el principal elemento aleante es el Mg. El Mg se considera más efectivo para producir endurecimiento e incremento en la resistencia de este tipo de aleaciones en comparación con el Mn (un 0.8% de Mg produce el mismo efecto que un 1.25% de Mn); además de que se puede añadir en mayores cantidades que el Mn. Las principales características de estas aleaciones son de media a alta dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en atmosferas marinas y baja capacidad de trabajo en frío. Alcanzan una resistencia de 193 MPa después del recocido. Estas características hacen que estas aleaciones se usen para soldadura, adornos decorativos, ornamentales y arquitectónicos, iluminación de las calles y carreteras, botes, barcos y tanques criogénicos, partes de puentes, grúas y estructuras de automóviles [7,8].

Serie 6xxx. Estas aleaciones usan como elementos aleantes principales el Mg y el Si en proporciones adecuadas para que se forme el siliciuro de magnesio (Mg_2Si). Esto hace que estas aleaciones sean tratables térmicamente y alcancen una resistencia de hasta 290 MPa. Aunque estas aleaciones no son

tan resistentes como las de los grupos 2xxx y 7xxx, aún presentan buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión. Estas aleaciones pueden conformarse mecánicamente después de un tratamiento de solución T4 y posteriormente ser endurecidas por medio de un tratamiento de precipitación T6. Sus aplicaciones suelen ser en elementos arquitectónicos, cuadros de bicicleta, pasamanos de puentes, equipo de transporte y estructuras soldadas [7,8].

Serie 7xxx. El principal elemento de aleación es el Zn, pudiendo ser añadido en proporciones que van desde el 1 al 8 %. En algunas aleaciones de este grupo, se añaden pequeñas cantidades de Mg para aumentar la resistencia cuando se trata térmicamente. También es normal añadir otros elementos como Cu o Cr en pequeñas cantidades. La principal propiedad de estas aleaciones es su alta dureza, cuando son sometidas a un tratamiento T6, además de alcanzar una resistencia tensil de hasta 500 MPa. Estas aleaciones se emplean en las estructuras de los aviones, equipos móviles y otras partes altamente tensionadas. Debido a que esta serie muestra relativamente baja resistencia a la corrosión bajo tensión, se suele aplicar un ligero tratamiento de sobre-envejecido, para conseguir un mejor balance de resistencia mecánica, resistencia a la corrosión y tenacidad [6,7,8].

Serie 8xxx: Estas aleaciones contienen principalmente 6% de estaño y pequeñas cantidades de cobre y níquel. Estas aleaciones se emplean principalmente para las aleaciones empleadas en cojinetes y husillos para chumaceras y en los husillos para cigüeñales, debido a su bajo coeficiente de fricción y propiedades tribológicas [20].

Las aleaciones de aluminio para forja pueden ser divididas en dos grupos, aleaciones no tratables térmicamente y aleaciones tratables térmicamente. Las aleaciones de aluminio no tratables térmicamente solo pueden ser endurecidas por deformación en frío, para aumentar su resistencia. Las aleaciones de aluminio conformadas en frío y con capacidad de ser tratadas térmicamente, presentan una amplia gama de tratamientos que permiten obtener las propiedades mecánicas idóneas para una aplicación en particular [11, 12].

Las aleaciones de aluminio para fundición han sido desarrolladas para tener un buen balance entre propiedades mecánicas adecuadas y facilidad de producción, en particular, una buena castabilidad (fluidez o facilidad de llenar los moldes). Otras propiedades que se buscan son; alta resistencia a la corrosión y alta maquinabilidad. Las aleaciones para fundición difieren bastante de las aleaciones para forja. Utilizan una nomenclatura de tres dígitos seguido por un valor decimal para designar el tipo de proceso. Las aleaciones de aluminio son vaciadas principalmente por tres procesos:

- *Fundición en arena:* El metal fundido se vierte en un molde de arena. Es el método más sencillo y versátil, normalmente elegido para la producción de cantidades pequeñas de piezas fundidas idénticas, piezas fundidas complejas con núcleos complicados, grandes piezas fundidas y piezas fundidas para la construcción.
- *Molde permanente* Se vierte el metal fundido en un molde metálico permanente bajo gravedad o bajo presión centrífuga. Las piezas fundidas así tienen una estructura de grano más fino y son más resistentes que las piezas fundidas en moldes de arena, debido a que la velocidad de enfriamiento es más rápida. Además, las piezas fundidas en molde permanente poseen generalmente menores contracciones y porosidad

que las piezas fundidas en arena. Sin embargo, los moldes permanentes tienen limitaciones de tamaño, y para piezas complejas puede resultar difícil o imposible.

- *Fundición a presión.* Se funden piezas idénticas al máximo ritmo de producción forzando el metal fundido bajo considerables presiones en los moldes metálicos. Las dos partes de la matriz de metal son engatilladas de forma segura para poder resistir la alta presión. El aluminio fundido es obligado a repartirse por las cavidades de la matriz. Cuando el metal se ha solidificado, las matrices son desbloqueadas y abiertas para extraer la pieza fundida. Algunas ventajas de la fundición a presión son que las piezas están casi acabadas y pueden producirse a una alta velocidad de producción. Además, las tolerancias dimensionales de las piezas solidificadas pueden ser mantenidas en un rango mucho más estrecho, es posible la obtención de superficies suaves y el proceso puede ser automatizado [8,9].

2.4 Aleaciones Aluminio- Silicio para fundición

Según la Asociación Americana del Aluminio (AA) las aleaciones de aluminio con silicio como elemento principal de aleación corresponden a la serie AA 3xx.x. El elemento principal de la aleación es el silicio, aunque también se pueden añadir pequeñas cantidades de cobre y magnesio que actúan como elementos secundarios. El segundo y tercer dígito hacen referencia a las variaciones de aleación y el dígito después del punto decimal indica la forma en que se encuentra fabricada. Dentro de los diferentes grupos de aleación del aluminio, las aleaciones Al-Si son las que más se utilizan por la buena combinación en propiedades físicas y mecánicas. La serie 3xx.x puede ser subdividida a su vez en las aleaciones tratables y aleaciones no tratables térmicamente dependiendo del contenido de cobre, magnesio y níquel [5].

El sistema binario Al-Si presenta un punto eutéctico a 12 % de Si en peso. La adición de Si al aluminio ayuda a incrementar la fluidez del metal líquido, a disminuir la fragilización y a disminuir la contracción durante la solidificación. Estas características permiten diseñar piezas de diferentes formas, ya sean complejas o con cambios importantes de sección, con paredes desde muy delgadas a muy gruesas. Estas aleaciones también tienen buena soldabilidad y ductilidad. La mayoría de las aleaciones base Al-Si no son tratables térmicamente y normalmente son usadas cuando se requiere de buenas cualidades de moldeo y una alta resistencia a la corrosión.

A fin de mejorar las propiedades mecánicas, se adicionan pequeñas cantidades de otros elementos de aleación, principalmente Cu, Ni, Mg, Zn, entre otros. Las aleaciones Al-Si-Cu mejoran la resistencia a la fatiga, pero disminuye sensiblemente la resistencia a la corrosión. Si se añade Ni, se mejora la resistencia mecánica en caliente y la resistencia al desgaste, teniendo asimismo un bajo coeficiente de dilatación, estas características son adecuadas para pistones de automóviles. En la fabricación de piezas de motores de combustión interna (cabezas y bloque del motor, culatas, pistones) a menudo se emplean estas aleaciones con composiciones especiales no normalizadas de alto contenido en Si o aleaciones híper-eutécticas.

En la Figura 2.1 se muestra el sistema binario Al-Si y las microestructuras desarrolladas en condiciones de solidificación en equilibrio para diferentes niveles o porcentajes de Si. Se muestra el punto eutéctico a una composición de 12% de Si y a una temperatura de 577 °C (datos más precisos han sido publicados por J.L. Murray et. al [20] y son 12.6% de Si a 577 °C). La microestructura es muy sensible al contenido de Si y se traducirá en la presencia de diferentes fases, así como el tamaño y distribución de dichas fases. Se consideran, nominalmente, aleaciones hipo-eutécticas aquellas con contenidos menores a 12% de Si; y aleaciones híper-eutécticas aquellas con contenidos mayores a 12% de Si. En una aleación hipo-eutéctica, el silicio está formando la fase eutéctica y no se tiene silicio primario. En las aleaciones híper-

eutécticas se tienen granos o cristales de silicio primario que afectan drásticamente la maquinabilidad. Las mejores condiciones de mecanizado es cuando se tiene una microestructura completamente eutéctica, libre de fase alfa rica en aluminio y libre de fase silicio primario. En las aleaciones híper-eutécticas, entre más grande sea el tamaño de grano de los cristales de silicio primario, menor será la maquinabilidad de la aleación. Esto debido a que los granos de silicio primario actúan como partículas duras y abrasivas, aumentando el desgaste y ruptura de las herramientas (véase Figura 2.1).

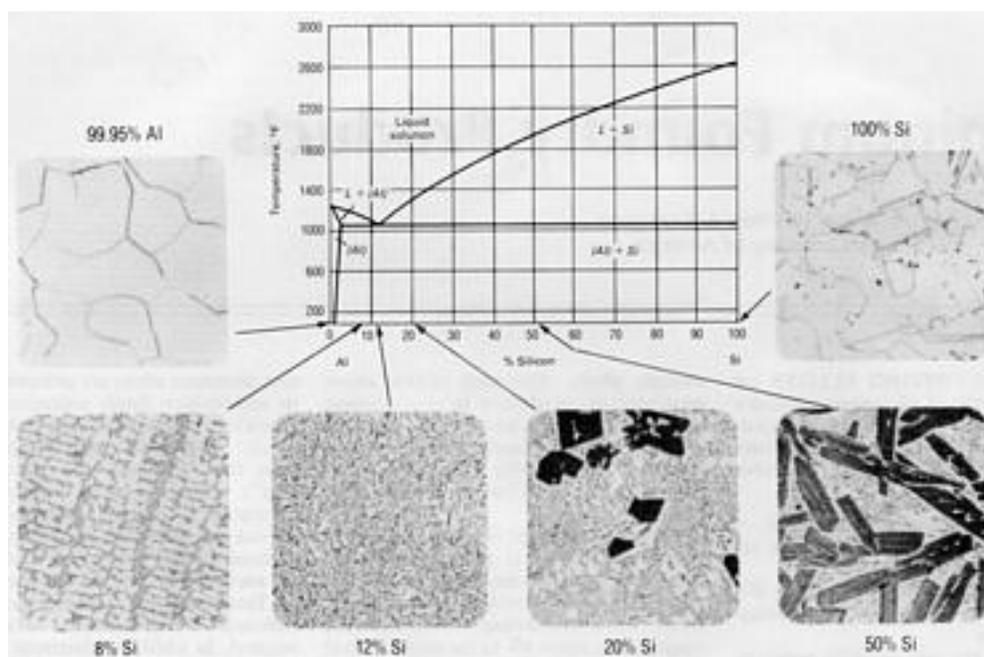


Figura 2.1.- Diagrama de fases Aluminio-Silicio y microestructuras típicas de la aleación vaciada a diferente composición de silicio. El punto eutéctico es alrededor del 12% de Si [5].

Es preferible tener un tamaño de grano equiaxial, fino y lo más uniformemente distribuido ya que incrementa notoriamente las propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y aspectos en acabado superficial. Al refinar la estructura el efecto se traduce en una menor segregación y es posible reducir y mejorar la distribución de defectos y constituyentes intermetálicos. El tamaño

de grano se ve influenciado principalmente por la velocidad de solidificación y mediante la refinación química por pequeñas adiciones de sodio, calcio, antimonio, estroncio, titanio o boro.

A las aleaciones que tiene un tamaño de grano más grueso se le aplican modificadores. La modificación de la estructura eutéctica se realiza para mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio-silicio. El objetivo es transformar una estructura de tipo placas de silicio eutéctico a una estructura fibrosa (véase Figura 2.2). La modificación se puede realizar mediante una rápida solidificación o mediante la adición de ciertos elementos del grupo I y IIa de la tabla periódica. Los elementos que han demostrado tener un efecto marcado sobre la modificación del silicio son principalmente sodio y estroncio.

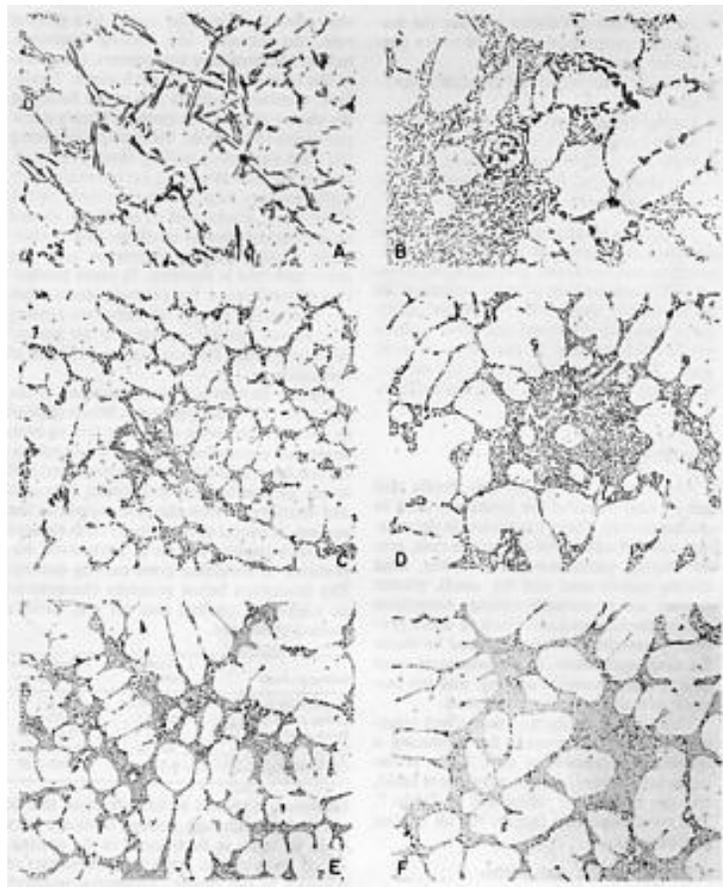


Figura 2.2.- Variación del eutéctico en una aleación de Aluminio-Silicio. Totalmente no modificada (A) hasta completamente modificada (F) [5].

Estas modificaciones se realizan para transformar la microestructura y que presente un grano más fino ya que esto va a ayudar a tener mejores propiedades y facilitar el corte de material cuando se está mecanizando.

2.5 Principales tratamientos térmicos de las aleaciones de aluminio

Los tratamientos térmicos generalmente son aplicados para modificar la microestructura de la aleación. Así mismo se busca incrementar la dureza o la resistencia para lograr mejores propiedades mecánicas y físicas. También se busca estabilizar dimensionalmente a las piezas a tratar, y a disminuir los esfuerzos residuales.

Al realizar los diferentes tratamientos térmicos, el aumento de la capacidad de solubilización de algunos elementos, con el aumento de la temperatura, nos da una mejor respuesta, modificando las propiedades mecánicas o utilizando variaciones de temperatura dentro de la solución sólida y por medio del control de la precipitación de de las fases.

Según la norma ANSI H35.1, la designación básica consiste en una letra mayúscula, seguida por uno o más dígitos que representan la subdivisión general. Estos dígitos designan secuencias específicas de tratamientos que producen características particulares en la aleación. Esta designación está dada por [4]:

F: Piezas y productos en bruto. Es el material tal como sale del proceso de fabricación, ya sea por fundición, conformado en caliente o en frío.

O: Recocido. Se aplica a materiales conformados mecánicamente ó a piezas de fundición que son tratadas térmicamente por medio de un recocido

completo para obtener mejor resistencia tensil, ductilidad, exactitud dimensional, entre otras. Esta puede seguir de un dígito diferente de cero.

W: Tratamiento Térmico de Solución. Se aplica en cualquier aleación que envejezca espontáneamente a temperatura ambiente después de recibir un tratamiento térmico, quedando con una estructura inestable. Esta designación es específicamente cuando se tiene envejecimiento natural.

H: Endurecimiento por Deformación. Se aplica a productos o piezas conformadas mecánicamente y que son endurecidas por deformación en frío. No se aplica a piezas fundidas.

T: Tratamiento Térmico de Solución: Denomina a aleaciones que han sido endurecidas por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación complementario. La designación T siempre tiene una subdivisión representada por un número comprendido entre 1 y 10. Estos se mencionan a continuación:

- **T1:** Enfriado desde un proceso de formado realizado a elevada temperatura y envejecido de forma natural hasta una condición de propiedades mecánicas estabilizadas.
- **T2:** Enfriado desde un proceso de formado a altas temperaturas, trabajado en frío y envejecido de forma natural hasta una condición de estado estable. Se utiliza específicamente para mejorar la dureza enfriando después del laminado o extrusión en caliente.
- **T3:** Tratamiento Térmico de Solución, seguido de un trabajado en frío y envejecido de forma natural hasta alcanzar una condición estable. Se usa específicamente para mejorar la dureza después del tratamiento térmico a la solución.
- **T4:** Tratamiento Térmico de Solución y envejecido de forma natural hasta alcanzar una condición estable en las propiedades mecánicas. Es un tratamiento similar a T3 pero sin el trabajo en frío.

- **T5:** Enfriado desde un proceso de formado a altas temperaturas y envejecimiento artificialmente. Aplica a los productos que no son trabajados en frío y las propiedades mecánicas y de estabilidad dimensional han sido sustancialmente mejoradas.
- **T6:** Tratamiento Térmico de Solución y envejecimiento artificial. Este tratamiento se aplica a productos que no han sido deformados en frío después del tratamiento de solución. Las propiedades mecánicas y de estabilidad dimensional son mejoradas.
T7: Tratamiento térmico de solución y sobre-envejecimiento o estabilización. Este tratamiento se aplica a productos conformados mecánicamente en caliente y que han sido tratados térmicamente por precipitación más allá del máximo punto de máxima resistencia para mejorar la resistencia a la corrosión y a la fractura.
- **T8:** Tratamiento Térmico de Solución, trabajado en frío y envejecimiento artificial. Este tratamiento se aplica a productos que han sido deformados en frío para mejorar la resistencia después del tratamiento de solución. Mejora la dureza, las propiedades mecánicas y de estabilidad dimensional después del tratamiento térmico.
- **T9:** Tratamiento térmico de solución, envejecimiento artificial y trabajado en frío. Este tratamiento térmico se aplica a productos que son deformados en frío específicamente para mejorar la resistencia mecánica después de que han sido tratados térmicamente por precipitación.
- **T10:** Enfriado desde un proceso de conformado realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente. Este tratamiento se aplica a productos que han sido deformados en frío específicamente para mejorar la resistencia mecánica después de que han sido enfriados desde la temperatura de conformado en caliente y finalmente envejecidos artificialmente hasta una condición sustancialmente estable.

2.6 Aplicaciones del aluminio en el área automotriz

La industria automotriz ha impulsado el desarrollo de nuevas y mejores técnicas y prácticas de producción, requiriendo nuevas y mejores piezas, capaces de asegurar el cumplimiento de estrictos requisitos de seguridad, reducir el peso de las unidades e incrementar el desempeño del automóvil, con tendencias al ahorro de combustible y menor emanación de gases de combustión. En otras palabras hacer los motores de combustión interna más eficientes y de menor impacto ambiental. El aluminio es un material ideal para estas aplicaciones gracias a que es ligero, resistente a la corrosión, con buenas propiedades mecánicas y es fácil de moldear.

Esta industria se encuentra entre las más desarrolladas, gracias a la apertura de los mercados y la imposición de normas y estándares de fabricación y desempeño cada vez más estrictos.

A partir de las diferentes crisis de combustibles, y en particular las del petróleo que se dieron durante la segunda mitad del siglo XX, y a los cada vez más altos niveles de contaminación atmosférica en las grandes ciudades, pero con efectos a nivel global, todo esto ha forzado que tanto los gobiernos de las naciones más industrializadas como las empresas automotrices realicen grandes esfuerzos en reducir el consumo de energéticos, principalmente los combustibles a base de hidrocarburos fósiles [13]. Investigaciones recientes han mostrado que las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) producto de la combustión de hidrocarburos en motores de combustión interna (gasolina y diesel) están contribuyendo al cambio climático global [14]. Estos dos efectos combinados, motivaron a que el gobierno de los EEUU anunciara en el año 2009 un ambicioso programa nacional de ahorro de combustibles el cual incluye medidas legislativas y regulaciones federales para que los automóviles modelos 2016 cumplan con un rendimiento de combustible de 35.5 millas por galón

(15.10 km por litro) comparado con las 25 millas por galón (10.85 km por litro) actuales [15].

Para cumplir con esta nueva legislación, los fabricantes de automóviles deben mejorar el rendimiento de los motores. Lo anterior se puede lograr por medio de reducir el peso de los vehículos, reducir las pérdidas de energía por fricción de los componentes del motor e incrementando la potencia de los motores. Una manera de reducir el peso de los vehículos en general, y de los motores en particular, es sustituir los componentes pesados de acero o hierro por aleaciones más ligeras. Ya desde la década de 1970, se realizaron esfuerzos por sustituir a las cabezas y monoblocks de hierro de los motores por aleaciones ligeras de aluminio. Los monoblocks de aluminio requirieron del uso de cilindros (liners) de hierro, ya que las aleaciones de aluminio no presentaban una buena resistencia al desgaste provocada por el contacto deslizante y recíprocante de los anillos del pistón. Estos cilindros o liners siguen siendo pesados y presentan problemas de diseño y de transferencia de calor.

Las aleaciones de aluminio-silicio híper-eutécticas para aplicaciones en motores automotrices ha sido un desarrollo reciente. En particular, las aleaciones para monoblocks sin camisas (linerless engine blocks) representan una nueva tecnología que pudiera cambiar drásticamente el diseño y construcción de motores de combustión interna, de ahí que muchas compañías automotrices, aún guardan con gran sigilo sus desarrollos como secretos industriales o como patentes industriales. Un caso emblemático es la empresa Ferrari en Italia, que ha desarrollado este tipo de aleaciones, en primera instancia para sus vehículos de competencia en fórmula F1 y seguido, para sus automóviles de calle de alto desempeño como lo es el F12 Berlinetta [16]. Otro ejemplo es la recientemente patentada aleación 12-13Si, por parte de la empresa mexicana, Nemak [17]. Esta aleación cuenta con una alta resistencia al desgaste [18,19].

El uso de nuevas aleaciones de aluminio en los componentes de transportes ha aumentado en forma constante en la última década. La utilización de este metal reduce ruido y vibración.

El aluminio es 100 por ciento reciclable, no se oxida como el acero; haciendo que los vehículos tengan mayor resistencia en zonas climatológicas de gran humedad. Los autos con cuerpo de aluminio duran tres o cuatro veces más que los que tienen un chasis de acero.

Las aleaciones empleadas en la industria automotriz deben de asegurar buenas propiedades mecánicas. Es normal referir una cierta dureza, resistencia y ductilidad, sin embargo, se debe de cumplir con un índice de calidad (Q) expresado en términos de la resistencia mecánica y la elongación a la fractura determinada en un ensayo de tensión:

$$Q = \sigma + d \log \epsilon$$

Donde σ y ϵ representan el esfuerzo y la deformación a la fractura respectivamente, d es un parámetro empírico.

Alrededor del 85% de las aleaciones de aluminio para fundición, son aleaciones Al-Si-Cu. Esta familia de aleaciones proporciona una buena combinación de costo, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, junto con la alta fluidez requerida para facilitar el moldeo [21].

Referencias

- [1] *Handbook of Aluminum, Volume 7, Physical Metallurgy and Processes*, edited by George E. Totten & Associates, Inc. Seattle, Washington, U.S.A., D. Scott MacKenzie, Houghton International Incorporated, Valley Forge, Pennsylvania, U.S.A.
- [2] *Informe sobre reservas mundiales de aluminio elaborado por el USGS (en inglés)*.
<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/aluminum/alumimcs07.pdf>
- [3] *World research. Industrias de aluminio en la búsqueda de energía barata*. Offnews.info
<http://www.offnews.info/downloads/industrias-aluminioPacheco.pdf>
- [4] A.Kearney and E.L.Rooy. *Aluminium Foundry Products*. In: *ASM Handbook*. Vol. 2. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1998. pp. 123-151.
- [5] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1998.
- [6] John E. Hatch “*Aluminium: Properties and physical Metallurgy*”, Londres, 1992.
- [7] *Blog de Ingeniería de Materiales – Categoría Materiales Metálicos*
<http://ingenieriademateriales.wordpress.com/category/materiales-metalicos/>
- [8] *ASM Handbook, Vol 2, 10^a Edition, ASM International. E. U 1992*
- [9] *Frank King “El Aluminio y sus Aleaciones” México, 1992*
- [10] *Grimes, R., Cornish, A. J., Miller, W.S and Reynolds, M. A. “Metals and Materials” E. U. Junio 1985.*
- [11] *WILLIAM D. CALLISTER, Jr. “Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales”. 1995. Ed. Reverté, S.A*

- [12] WILLIAM F. SMITH "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales". 1993. Madrid: Editorial Mc Graw Hill.
- [13] World Oil Crisis: Driving forces, Impact and Effects. En: <http://world-crisis.net/oil-crisis.html>. 2008. Consultado el 21 de mayo 2012.
- [14] U.S. Environmental Protection Agency. Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2008. April 15, 2010
- [15] M.Allen, E.Javer. Obama announces new fuel standards. En: www.politico.com. May 19, 2009
- [16] Ian Bamsey. F1 Engine Power Secrets. En: <http://www.pureluckdesign.com/ferrari/f1engine/> Consultado el 21 de mayo 2012.
- [17] NEMAK. Comunicación privada de Nematik, México. Enero 2012. Patente NEMAK 20100288461.
- [18] Jesús O. González González. Desarrollo de un Sistema tribológico con Movimiento Lineal Reciprocante. Tesis para el Grado Doctor en Ingeniería de Materiales. FIME-UANL. En proceso. México, 2012.
- [19] F. Morales-Rendón. Estudio de desgaste en aleaciones de aluminio-silicio híper-eutécticas. Tesis para el Grado Doctor en Ingeniería de Materiales. FIME-UANL. En proceso. México, 2012.
- [20] A.Pérez. Metales No Ferrosos. Notas de Curso. FIME-UANL. Mex. 2010.
- [21] J.L. Murray et.al., 1984. Bulletin of Alloy Phase Diagrams. ASM International. In: ASM Handbook, Vol. 3. Alloy Phase Diagrams. ASM International. USA, 1992. Pp. 2.52.

CAPÍTULO 3

MAQUINADO DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO

Maquinado es un proceso de fabricación diseñado para eliminar el material sobrante por medio de una herramienta de corte, generalmente eliminándolo en forma de viruta, de una pieza de trabajo [1]. Es una operación importante en la producción de monoblocks y cabezas de motor y un alto porcentaje del valor agregado de la piezas está directamente ligado a los costos de los diferentes tipos de maquinado de piezas para motor [2,3].

En este Capítulo se revisarán los conceptos fundamentales del maquinado, ya que es un tema tan complejo que no puede definirse sin ambigüedades. Se analizará la geometría y los materiales para las herramientas de corte, los lubricantes que son imprescindibles para optimizar los procesos de producción, se profundizará en el tipo de proceso de mayor interés en este trabajo, que es precisamente el fresado de las aleaciones de aluminio-silicio. Se expondrán los factores que influyen en la maquinabilidad y la dificultad de cuantificarla en forma absoluta, ya que es un término cualitativo [4,5].

3.1 Introducción a la teoría del maquinado

El maquinado es un término que abarca una serie de procesos de fabricación diseñados para eliminar el material no deseado, generalmente en forma de viruta, de una pieza de trabajo. Se utiliza para convertir piezas fundidas, forjadas, o bloques preformados de metal en diversas formas, con el tamaño y acabado específico para ciertos requisitos de diseño [1]. El maquinado es un fenómeno entre la interacción de la pieza de trabajo y la herramienta de corte, ya que en cada operación de maquinado esta interacción va a ser diferente cuando se varían la geometría y tipo de material ó el medio en el cual se va a maquinar, ya sea seco o húmedo y la variabilidad de los parámetros de maquinado.

La mayoría de las aplicaciones industriales del maquinado sobre otros procesos de manufactura tienen mayor ventaja debido a que este proceso tiene la capacidad de formar geometrías complejas, dimensiones y tolerancias precisas, sin modificar las propiedades físicas del material. Aunque el proceso de corte de metal se ha estudiado teóricamente, no se cuenta con la información necesaria para maquinar los nuevos materiales que están en desarrollo. Por lo tanto, el maquinado es uno de los procesos más importantes de fabricación debido al valor añadido al producto final y de gran influencia cuando se quieren optimizar los aspectos económicos de un proceso de producción. [1,6,7].

Entre las máquinas-herramientas más utilizadas para cortar metales se encuentran las sierras de cinta, cortadoras de disco, tornos, cepillos, taladros, fresadoras, afiladoras, formadores, máquinas de brochar, centros de maquinado de estaciones múltiples, entre una gran variedad de máquinas. Cada una cuenta con diferentes configuraciones por lo que es necesario hacer pruebas reales de maquinado para la determinación de los parámetros óptimos y correspondientes para cada material.

La maquinabilidad es un tema tan complejo que no puede definirse sin ambigüedades, no tiene una definición exacta, aceptada universalmente y es un término cualitativo ya que no tiene unidades de medida. Sin embargo, dependiendo de la aplicación se ha propuesto medir la maquinabilidad en términos de la vida de la herramienta, la fuerza de corte, el consumo de potencia, el acabado superficial, entre otros parámetros [8].

Como ya se ha mencionado antes, el maquinado es un proceso con diferentes operaciones y condiciones de trabajo. El rendimiento de maquinado está influenciado por la vida de la herramienta de corte, nivel de desgaste, y la probabilidad de fractura; el consumo de energía específica, fuerzas y el aumento de la temperatura; el control de viruta y las tolerancias dimensionales en función de la rugosidad superficial, la microestructura y por último el costo total [9].

La máquina-herramienta se va a ver afectada por diversas variables como las propiedades físicas y mecánicas, tanto del material a maquinar como del material de la herramienta de corte. El desgaste de las herramientas es la pérdida de material en los filos de corte debido a la interacción física con la pieza de trabajo. También se ve afectada por la formación de viruta, la fricción al deslizarse la viruta, el acabado de la superficie, y los parámetros de maquinado entre los que se pueden mencionar: la velocidad de corte, velocidad de avance y la profundidad de corte. Sin embargo, la influencia del material de la pieza sobre el material de la herramienta de corte se tiene que tomar en cuenta con especial cuidado. La composición química, la microestructura, la porosidad, las inclusiones no-metálicas, las propiedades físicas y mecánicas; los tratamientos térmicos, y los diferentes métodos empleados para la conformación del material a maquinar: por fundición, forja, laminado, extruido, estampado, metalurgia de polvos, sinterizado, entre otros. Por lo anterior, el proceso de maquinado se realiza en forma diferente para cada caso en particular [10,11].

Entre los factores que influyen sobre la maquinabilidad, están la abrasión, adhesión, difusión, y la fatiga de las herramientas. Estos son los elementos básicos que puedan causar un desgaste prematuro en las herramientas de corte [12]. El tamaño del grano y las inclusiones en el material a maquinar van a determinar si disminuye o aumenta la maquinabilidad. Otro factor importante es la dureza ya que si el material es demasiado blando la viruta se desprende con dificultad, y en cambio, una alta dureza hace que la penetración de la herramienta sea más difícil y cuando el material posee una dureza superior a 50HRC, la maquinabilidad se reduce tanto que es ya casi imposible de maquinar con los procesos tradicionales. Como la rigidez va en relación directa con la dureza, a mayor rigidez mayor dureza, luego cuanto mayor sea la relación entre el límite elástico y la resistencia mecánica, se ve afectada la maquinabilidad. En términos generales, cuando se tiene menor ductilidad es beneficioso para la mecanización, ya que promueve la producción de viruta discontinua [9, 13].

Los tratamientos térmicos mejoran las propiedades mecánicas, aumentando la dureza y mejorando el acabado de la superficial de la pieza mecanizada. Estas alcanzan una dureza mínima de 80 HB para la fundición de aleaciones Al-Si hipo-eutécticas [14,15].

La mayoría de la aleaciones de aluminio utilizadas para la industria automotriz y aeroespacial contienen como principales elementos de la aleación Cu, Mg y Si. Las aleaciones con cobre tienen buena relación dureza-peso pero tienen que ser sometidas a TT de solubilidad o de envejecimiento para mejorar sus propiedades mecánicas, y no tienen buena resistencia a la corrosión. En cuanto al magnesio, las principales características de estas aleaciones son de una media a alta dureza por endurecimiento por deformación, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión en atmosferas marinas y una baja capacidad de trabajo en frío. El silicio reduce el coeficiente de expansión

térmico y una alta resistencia al desgaste, además ayuda a incrementar las propiedades mecánicas. Este elemento actúan como material abrasivo en una matriz suave, lo que incrementa el desgaste y disminuye la vida de la herramienta de corte [15,16,17]. Los elementos que se utilizan para mejorar la maquinabilidad de las aleaciones de aluminio y de los acero son el bismuto (Bi), estaño (Sn), plomo (Pb), azufre (S) y cadmio (Cd).

Uno de los temas importantes cuando se estudia el maquinado de metales y aleaciones, es el control y la eliminación de la viruta. A la hora de maquinar la pieza de trabajo se van a tener ciertas limitantes ya que existen diferentes tipos y formas de viruta. Estas dependen de diversas variables como el tipo de material, la velocidad de corte, la velocidad de avance, las propiedades mecánicas y termo-físicas y la micro estructura de la pieza que se va a maquinar[10].

Entre los defectos más comunes en las piezas fundidas se encuentra la porosidad, la cual puede ser muy crítica, no solo para las propiedades mecánicas de la pieza a fabricar, sino también para su maquinabilidad. Esto trae problemas durante el maquinado, ocasionando superficies de mala calidad y afectando la vida de la herramienta de corte.

Debido a que no existe una metodología universalmente aceptada para evaluar la maquinabilidad y como se van desarrollando nuevos materiales, muchos fabricantes han encontrado grandes dificultades para seleccionar el material más adecuado para su producto [18]. Existe una necesidad industrial y científica para desarrollar un procedimiento simple, sistemático, lógico y conveniente que permita a la industria evaluar la maquinabilidad de los nuevos materiales de manera eficiente y efectiva [6]. Este es uno de los propósitos de

esta tesis; el de elaborar pruebas de maquinado que nos permitan obtener los parámetros óptimos en función de la aleación, microestructura y dureza.

3.2 Fresado

El fresado es uno de los procesos de maquinado más importantes y más frecuentemente usado en la industria actual. Permite maquinar superficies planas, ranuras, engranajes e incluso superficies curvas o alabeadas, su movimiento principal consiste en eliminar el metal mediante la rotación de herramientas con múltiples filos de corte casi en cualquier dirección, cada filo o diente elimina una pequeña cantidad de metal con cierta revolución del husillo, esta viruta es arrancada con el fin de obtener piezas de diversas formas y dimensiones [19].

El fresado es una operación de alto costo, debido a que se enfrenta a problemas que afectan la velocidad producción. Entre los más comunes están la fractura, el desgaste de herramienta o de los filos, esto nos da como resultado productos con diferencia de rugosidades disminuyendo la calidad superficial. Estos problemas generan grandes pérdidas económicas, Sin embargo si se realiza una buena elección de los factores que lo puedan afectar se pueden obtener ventajas en el fresado como alta eficiencia al maquinar, buen acabado superficial, precisión, flexibilidad en la producción de formas.

Es aquí donde nace la necesidad de investigar para poder mejorar e incrementar la productividad en esta parte del proceso de manufactura de los motores de combustión interna y de las aleaciones de aluminio, ya que si se tienen los valores indicados se puede optimizar el proceso.

Existe gran diversidad de máquinas para el fresado. Son de diferentes tipos, tamaños, y cada vez son mucho más eficaces y dan mejores resultados. El fresado ha encontrado muchas aplicaciones a través del desarrollo de las máquinas, controles y herramientas de corte, variando componentes y combinando diferentes procesos en una misma máquina. Con un control estricto del fresado, se puede sustituir el rectificado, ciertos maquinados de acabado y el mecanizado por electroerosión.

Aunque existen diversos tipos de fresado, la máquina fresadora puede ser esquematizada como dos tipos de procedimientos o modos de trabajo principales, ver Figura 3.1.

- **Fresado cilíndrico o Tangencial:** El eje de la fresa se encuentra situado paralelamente a la superficie de la pieza de trabajo. La fresa arranca la viruta exclusivamente con los filos situados en la periferia. Las virutas son de espesor variable y tienen forma de “coma” por ello la maquina puede experimentar carga de trabajo irregular [20].
- **Fresado Frontal:** El eje de la fresa está colocado perpendicularmente a la superficie de la pieza de trabajo, la fresa no solamente corta con los filos de la periferia cilíndrica, sino también con los frontales que a su vez realizan una labor de afinado en la superficie mecanizada. Las virutas son de espesor uniforme regular haciendo la carga de trabajo más uniforme obteniendo así un mejor aprovechamiento de la máquina y como consecuencia un rendimiento superior [20].

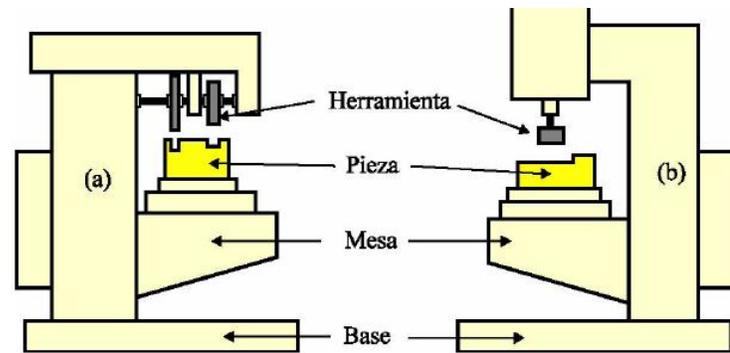


Figura 3.1. a) Fresado tangencial y b) Fresado frontal [29].

3.3 Parámetros de maquinado

Los parámetros más importantes en el proceso de fresado se muestran en la Figura 3.2. Estos se van a definir a continuación.

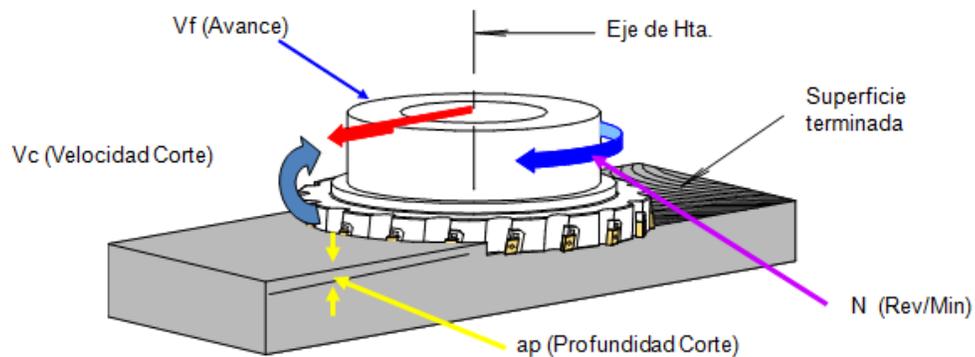


Figura 3.2. Parámetros de maquinado [27]

La Velocidad de corte (V_c) es la velocidad lineal con la cual los filos de corte de la herramienta se desplazan a lo largo de la pieza (m/min). Varía en

función de la dureza del material a maquinar, la calidad de la herramienta de corte y del avance elegido. Los materiales de menor dureza se mecanizan a altas velocidades de corte, mientras que los materiales más duros se mecanizan a velocidades inferiores. El empleo de diferentes refrigerantes permite variar la velocidad hasta un 25%. Si el ángulo de posición de la herramienta es menor a 90° , la velocidad de corte puede ser aumentada sin que disminuya la vida de la herramienta. En general, disminuyendo la velocidad de corte se prolonga la vida de las herramientas [20]

El avance (V_f) es desplazamiento rectilíneo relativo entre pieza de trabajo y la herramienta, el máximo avance que podemos utilizar depende entre otras cosas, de la potencia de la máquina, material a maquinar, la herramienta de corte utilizada y de la calidad superficial requerida. Para una correcta elección del avance es útil establecer una relación entre avance (V_f) y profundidad de pasada (a_p), para asegurar un espesor mínimo de viruta de 0.1 mm, para que el corte sea eficiente.

En relación a este aspecto podemos encontrar diferentes tipos de pasos de dientes en las fresas, donde (u) determina el alojamiento de la viruta, estos tipos de paso son, grande (A), normal (B) y reducido (C) y serán–descritas a continuación, ver Figura 3.3 [20].

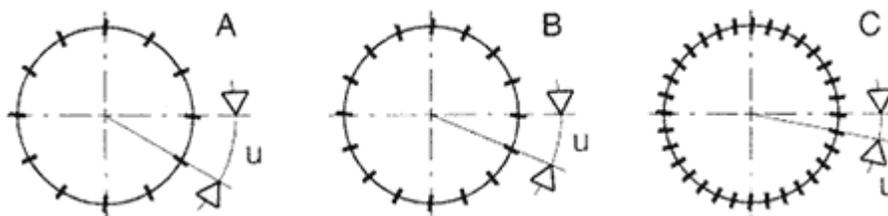


Figura 3.3. Tipos de paso A) grande, B) normal y C) reducido [20]

- A. Paso grande: Tiene menor número de dientes y grandes alojamientos para la viruta. Son buenas para desbastes y acabados de aceros, donde el riesgo de vibraciones son altas.
- B. Paso normal: Tiene número de dientes y alojamientos para viruta moderados. Este tipo de fresa permite un alto régimen de arranque de viruta, son utilizadas en el maquinado de fundiciones y operaciones medias en acero.
- C. Paso reducido: Alojamiento reducido para la viruta, permiten grandes avances de mecanizado, son adecuadas para maquinados interrumpidos en fundición, desbastes de fundición y pequeñas profundidades de corte en aceros.

Un avance demasiado pequeño, al contrario de lo que pueda parecer, puede causar una mala rotura de viruta, menor duración del filo de corte y un calentamiento excesivo de la zona de corte, entre otros problemas. Se pueden distinguir tres tipos de avance que son [20]:

- **Avance por vuelta (V_f ó a_v).** Es el desplazamiento longitudinal de la pieza mientras la herramienta gira una vuelta completa
- **Avance por diente (F_z ó a_z).** Cuando la fresa gira y está avanzando a lo largo de la pieza, los dientes de la fresa entrarán y saldrán del corte generando virutas. El avance por diente es la distancia lineal recorrida por la herramienta durante el corte de un diente.
- **Avance por minuto (a_m).** Se llama así al desplazamiento rectilíneo de la pieza en un minuto.

En la tabla 3.1 se muestran las unidades y las formulas correspondientes para cada uno.

Tabla 3.1

Símbolo	Unidad	Nombre	Formulas
V_c	m/min	Velocidad de corte	$V_c = \frac{\pi \times \emptyset \times N}{1000}$
N	rpm	Revoluciones por minuto	$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times \emptyset}$
V_f ó a_m	mm/min	Avance por minuto	$V_f = N \times Z \times F_z$ ó $a_m = a_v \times n$
F_z ó a_z	mm/diente	Avance por diente	$F_z = \frac{V_f}{N \times Z}$ ó $a_z = \frac{a_v}{z}$
D	mm	Diámetro de la herramienta	
Z		Numero de dientes	
∅			

La profundidad de corte ó profundidad pasada (ap) es la profundidad axial de corte, se mide a lo largo del eje de giro de la fresa, y es la profundidad con la que penetra la fresa en la pieza al estar mecanizando. Esta depende del material a arrancar, del grado de precisión dimensional a conseguir, de la potencia de la máquina y de la relación con respecto al avance seleccionado. [20]

La máxima profundidad de pasada la define, principalmente el tipo de herramienta que se está utilizando y depende de varios factores como, la potencia de la máquina, el material a trabajar, la facilidad de deformación de la pieza y la estabilidad o sujeción de la máquina. De esta forma la capacidad de dar una profundidad determinada depende en gran medida del ángulo de posición y del tamaño de la herramienta, así como las dimensiones del inserto (IC) que le permitirá mayor tenacidad del filo de corte y poder aumentar la capacidad de corte, ver Figura 3.4 [20].

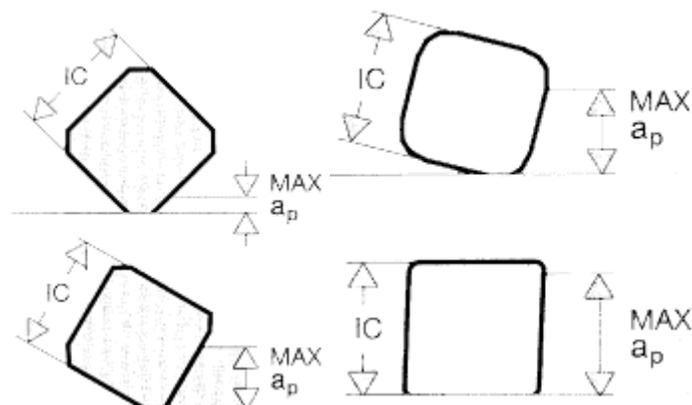


Figura 3.4. Ángulo de posición y tamaño de inserto [20]

Como norma general podría decirse que la profundidad de pasada (a_p), no debería ser mayor de las dos terceras partes de la longitud del filo de corte.

Por último, una de las variables ligada a la profundidad de pasada (a_p) es el ancho de corte (a_e), éste es la profundidad radial de corte, se mide a lo largo del diámetro de la fresa. Es la longitud que entra de la fresa, a la pieza de trabajo. El ancho de corte es uno de los parámetros a tener en cuenta debido a la influencia que tiene en el cálculo de la sección de viruta y consecuentemente en la fuerza de corte necesaria para poder realizar el maquinado [20].

Otros de los parámetros que intervienen y se clasifican en parámetros de corte o factores relativos a la máquina y que son importantes a la hora realizar un proceso son la potencia de la máquina (Kw), el ángulo de posición del filo de fresa con respecto a la superficie mecanizada (α), la dimensión de la viruta en cuanto al espesor medio y su longitud, el ángulo axial de posicionamiento del filo y la longitud o salida de la fresa, el uso de refrigerantes, la estabilidad de la máquina y la posición de la fresa con respecto a la pieza [20].

La elección del tipo de maquina es un factor a tener en cuenta a la hora de realizar un proceso de fresado. El tamaño de la mesa limita el tamaño de las piezas a maquinar. La rigidez de la fresadora, según el tipo de piezas, el material y las condiciones de corte, puede predecir si habrá vibraciones durante el maquinado. Para este problema, la sujeción de la pieza a la mesa es otro factor fundamental en la cual se tienen que elegir los mecanismos de sujeción más adecuados para asegurar las herramientas y realizar sus recorridos sin colisión, además de que la pieza quede sujeta con suficiente rigidez [19].

3.4 Herramientas de maquinado para fresadora

El fresado es uno de los métodos más universales de maquinado y uno de los más ampliamente utilizado. Comprende una gran variedad, no sólo de los tipos de operaciones que puede realizar, sino que se utiliza muy a menudo con diferentes tipos de herramientas de corte, máquinas y piezas.

Las herramientas de fresado se dividen en dos grupos, las fresas de insertos intercambiables y fresas monolíticas. Dentro de estos grupos existen una gran variedad de materiales con el fin de mejorar el proceso de corte, dependiendo de las especificaciones micro-estructurales que tenga el material de la pieza a maquinar. Estos dos tipos de fresas se pueden ver en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Diferentes tipos de fresas. A) Tipo inserto intercambiable. B) Tipo monolítica [29].

En la Figura 3.5. A) se muestran las fresas de insertos intercambiables montadas en un cabezal. En la Figura 5B) se muestra la fresa tipo espiga o monolítica.

La tecnología ha mejorado las herramientas para tener un mayor rendimiento de maquinado. En el pasado se utilizaban las fresas frontales con insertos de metal duro o carburo de tungsteno soldadas al cuerpo de la fresa, y después se afilaban cuando lo requerían. Las que tenían gran diámetro, eran diseñadas basándose en las herramientas soldadas de torneado. Normalmente eran sujetadas de diferentes formas en los cuerpos de las fresas. Este procedimiento era muy tedioso y tardado. Hoy en día, se pueden mejorar los procesos de producción y reducir los tiempos en la preparación de la herramienta gracias a la creación de los insertos intercambiables de diferentes materiales, que ayudaron a acelerar el proceso.

En el fresado, la denominación de la herramienta depende de cada material o uso de cada compañía normalizada según ISO. El código ISO consta

de nueve símbolos. Teniendo en cuenta esto, se procederá en el análisis de las herramientas más comunes.

3.5 Geometría y ángulos para las herramientas de maquinado

Las herramientas han sido un factor determinante en el desarrollo de la tecnología del maquinado. Hoy en día existe una gran variedad de geometrías cada vez más específicas y una composición físico-química cada vez más orientada al material a maquinar y a la operación a realizar. Esto las ha hecho más eficientes y más resistentes para cada proceso. Dentro del estudio de la herramienta, la geometría de ésta va a determinar ciertas especificaciones para su uso y para obtener mejores condiciones de corte [13,20].

Las fresas de espiga se dividen en dos partes que son (véase en Figura 3.6):

- - **Zona activa.** Es la parte de la herramienta en la que se encuentra la longitud y el diámetro de corte de la misma. La longitud de corte es la máxima dimensión con la que se puede mecanizar lateralmente en una pasada y el diámetro de corte es la máxima dimensión con la que se puede mecanizar frontalmente en una pasada.
- - **Mango.** En esta zona de la herramienta se localiza el diámetro y la longitud de la zona de sujeción de la herramienta.

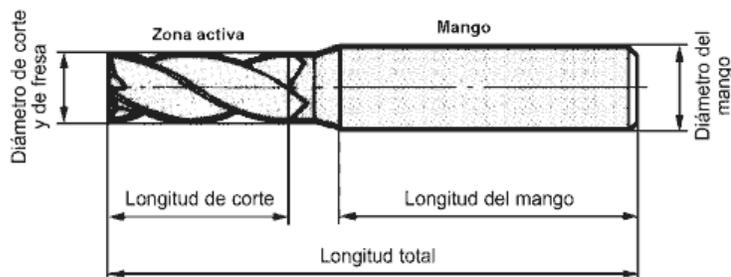


Figura 3.6. Ejemplo típico de una fresa tipo espiga [20]

Las partes de la fresa de insertos intercambiables, se componen principalmente del cuerpo o cabezal de la fresa, los insertos intercambiables y el sistema de sujeción de los insertos. Estas fresas mecanizan tanto frontalmente como lateralmente. La descripción de estas partes se detalla a continuación, ver la Figura 3.7.

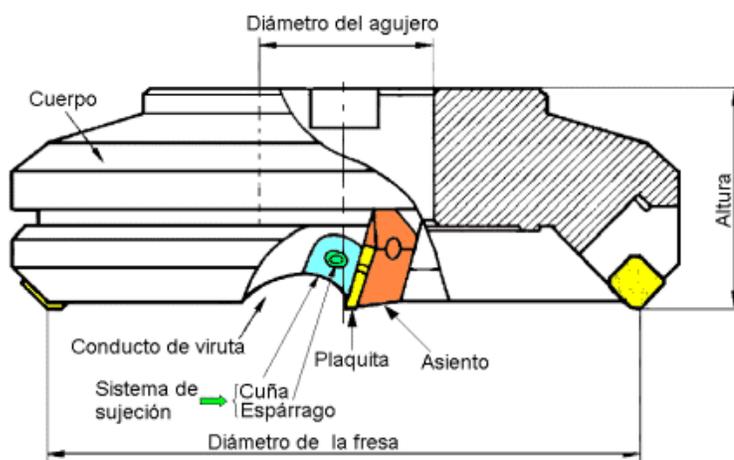


Figura 3.7 Cabezal de la fresadora e insertos intercambiables [20].

- **El cuerpo de fresa.** Es el elemento que soportará a los insertos y que a través del diámetro del agujero de la fresa y de un candado de sujeción se amarrará a la fresadora. Estará diseñado de tal forma que permita la evacuación adecuada de la viruta. El diseño y denominación dependerá de cada fabricante de herramientas [20].
- **El inserto.** Es el elemento que realizará el arranque de viruta e irá apoyada en el asiento para tener un buen soporte. El diámetro máximo formado por las aristas de corte de los insertos, será el diámetro de corte [20].
- **Sistema de sujeción.** Este sistema variará en función del tipo de fresa y del fabricante de herramientas. Algunos ejemplos según SECO [20,21].

- **Tipo S por tornillo:** El inserto está sujeto por un tornillo inclinado el cual empuja al inserto correctamente en su asiento. (véase en Figura 3.8)

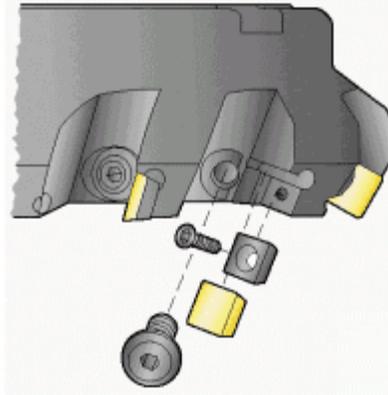


Figura 3.8 [21]

- **Tipo Cuña:** Los insertos son empujados a su correcta posición por medio de una cuña y un tornillo, los cuales se fijan al inserto sobre el apoyo. (véase en Figura 3.9)

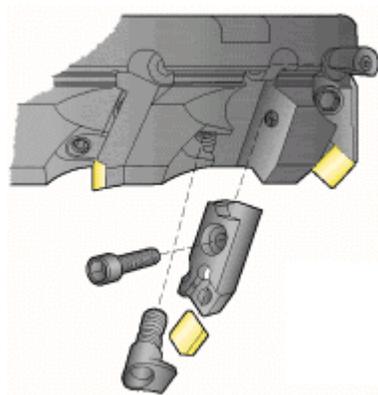


Figura 3.9 [21]

- **Tipo fijación Central:** Los insertos están asegurados a través de un agujero central por medio de un tornillo el cual empuja al inserto correctamente en su asiento. (véase en Figura 3.10)



Figura 3.10

- **Sujeción por acción elástica:** Los insertos están retenidos por la acción elástica del asiento en el cuerpo. (véase en Figura 3.11)

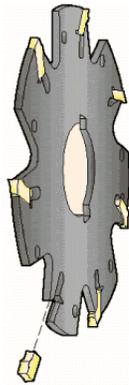


Figura 3.11 [21]

En la Figura 3.12 se puede identificar los diferentes tipos de sujeción.



Figura 3.12. Diferentes tipos de sujeción de los insertos al cuerpo de la fresa.

También existen diversas formas de montaje de la herramienta a la máquina fresadora. Consiste en que la parte activa de la fresa se monta directamente sobre el cuerpo de mango cónico, sujetándose mediante un tornillo tal como se indica en la Figura 3.13. En este sistema se pueden montar herramientas de diversos diámetros. Algunos tipos de los montajes o conos que existen en el mercado actual, poseen una gran variedad de tamaño dependiendo de cada modelo. Los modelos más comunes son los que a continuación se enlistan, y se pueden ver en la Figura 3.14.

- DIN2080 (se utiliza para fresadoras convencionales)
- DIN69871 (se utiliza en máquinas de media producción)
- DIN69871+BT (se utiliza en máquinas de alta producción)

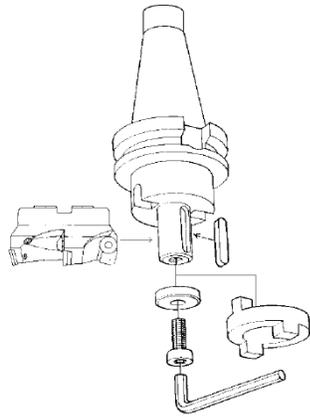


Figura 3.13



Figura 3.14

Hay que tener en cuenta que en algunas fresas, pueden existir más de una superficie o ángulo que tenga la misma denominación. Esto es debido a que algunas fresas tienen la posibilidad de realizar el maquinado por distintas partes de la herramienta, los principales ángulos en una fresa son (véase la Figura 3.15) [20]:

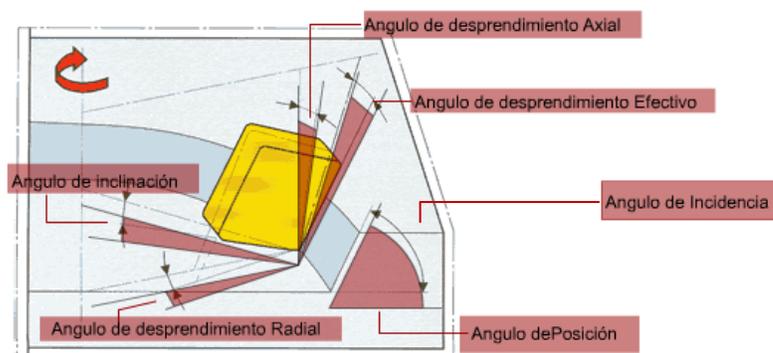


Figura 3.15. Principales ángulos en una fresa

- **Angulo de incidencia.** Es el formado por la superficie de incidencia y el plano de corte de la herramienta. Si el mecanizado se realiza

frontalmente se denominará ángulo de incidencia frontal (o axial) y si se realiza lateralmente, ángulo de incidencia radial.

- **Ángulo de desprendimiento.** En una fresa que pueda realizar el corte frontalmente y lateralmente, se tiene dos ángulos de desprendimiento. El ángulo de desprendimiento radial es el que se crea entre el radio de la fresa y la superficie de desprendimiento. El ángulo de desprendimiento axial, es el que se crea entre el eje de la fresa y la superficie de desprendimiento.
- **Ángulo de punta.** Es el formado por las superficies de incidencia y desprendimiento.
- **Ángulo de posicionamiento.** Es el formado por la superficie mecanizada y la arista de corte.
- **Ángulo de la hélice.** Es el formado por el desarrollo del filo de corte lateral y el eje de la herramienta al dar un giro de 360° .

Los ángulos en una fresa de mango, se muestran en la Figura 3.16 y Figura 3.17.

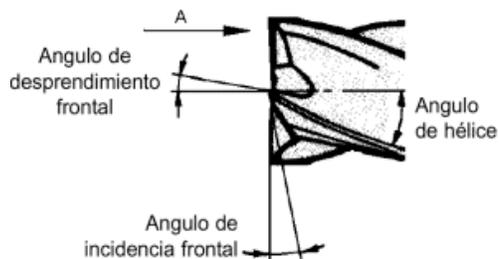


Figura 3.16 Ángulos en una fresa de mango

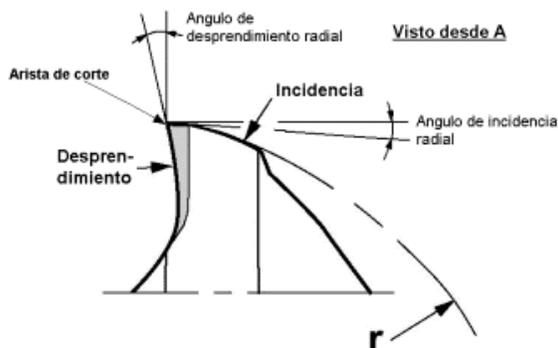


Figura 3.17 Ángulos en el filo

Los ángulos en una fresa frontal de insertos intercambiables, se pueden observar en la Figura 3.18.

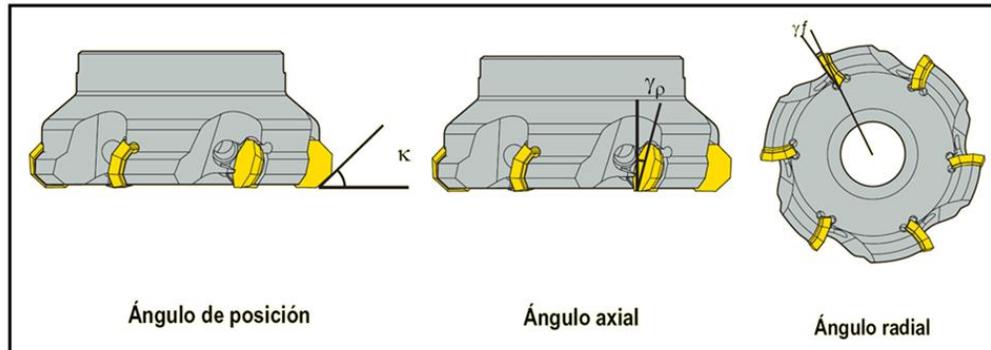


Figura 3.18. Ángulos en una fresa de insertos intercambiables

Las superficies más características en una fresa son: (véase la Figura 3.19)

- **Superficie de incidencia.** Es la superficie de la herramienta que da la cara a la superficie de corte.
- **Superficie de desprendimiento.** Es la superficie de la herramienta sobre la cual resbala la viruta. También se llama plano de salida o plano de ataque.
- **Arista de corte.** Es la que engendra la superficie de corte. También se puede definir como la arista formada por las superficies de desprendimiento y de incidencia.

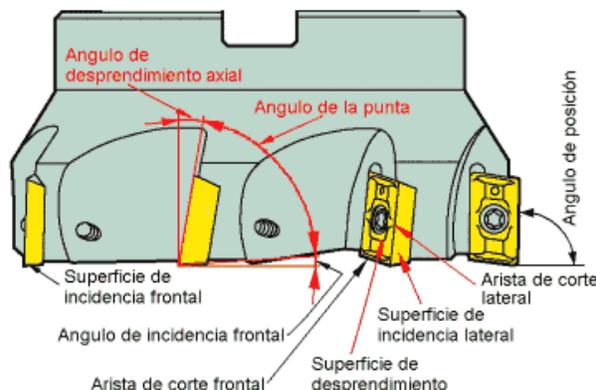


Figura 3.19. Superficies en una fresa de insertos intercambiables

La influencia de los ángulos de filo y sus funciones además de los anteriores ángulos comunes a casi todas las herramientas, son importantes para garantizar un adecuado mecanizado de las piezas a producir. En las fresas también tenemos los siguientes ángulos. El ángulo de posición para una fresa de escuadrar es de 90° y puede variar de 75° a 30° dependiendo de cada aplicación; sin embargo, con excepción de las aplicaciones que requieren un ángulo específico, el ángulo de posición más común es el de 45° porque reduce el espesor de viruta y la carga sobre la cara de corte, y elimina las vibraciones horizontales del inserto. Para fresar aleaciones de titanio, inconel y otros materiales duros se necesita incluso un ángulo más pequeño. Para estos trabajos se utilizan fresas con ángulos de posición desde 30° hasta 10° , e incluso se utilizan fresas del inserto redondo para minimizar el ángulo.

El ángulo de posición, el ángulo de desprendimiento efectivo y el de inclinación, contribuyen al rendimiento de la fresa. Estos vienen determinados por el ángulo de desprendimiento axial y radial. La tendencia actual del mecanizado es utilizar un ángulo de desprendimiento efectivo positivo para mejorar el rendimiento de corte y, a pesar de que el aumento de este ángulo reduce la resistencia del inserto, este problema se resuelve utilizando diferentes materiales de corte, geometrías de inserto y métodos de sujeción. La posición de los ángulos se puede ver en la Figura 3.20.

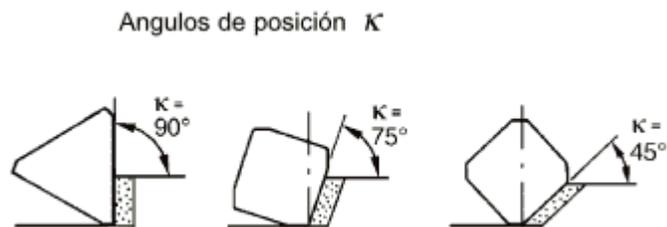


Figura 3.20. Posicionamiento de los insertos

La combinación de los ángulos de posición, desprendimiento axial y radial de las fresas se pueden dividir en tres grupos principales, negativa-positiva, doble positiva y doble negativa. Esta comparación se puede ver en la tabla 3.2 en la cual se mencionan las ventajas, desventajas y aplicaciones.

Tabla 3.2

	Fresa negativa-positiva	Fresa doble positiva	Fresa doble negativa
Combinación de ángulos	Desprendimiento axial positivo Desprendimiento radial negativo. Angulo de posición entre 45° - 60°	Desprendimiento axial positivo Desprendimiento radial positiva. Angulo de posición entre 60° - 75°	Desprendimiento axial negativo Desprendimiento radial negativo. Angulo de posición entre 60° - 75°
Ventajas	La mejor configuración para arranque de viruta con facilidad de corte	Buena acción de corte	Económica. Insertos reversibles.
Desventajas	Sólo son posibles insertos no reversibles	Menor resistencia del filo. Insertos no reversibles.	Acabado mate
Aplicaciones	Aceros y fundición, así como inoxidables, acero para moldes, etc.	Fresado general de aceros. Piezas de poca rigidez.	Fresado de fundición.

La selección de la herramienta o porta insertos, en función de la operación de mecanizado, pueden variar según diversos factores.

En relación a las fresas de espiga, se tendrá en cuenta como criterio general tres factores:

- El número de dientes: Cuando se mecaniza aluminio se utiliza generalmente un diente. Si se quiere realizar un chavetero en acero, donde se precisa taladrar con la misma fresa y un alojamiento de viruta aceptable, se utilizará fresa de dos dientes. Para los perfilados o contorneados, cuatro dientes. En los acabados, de seis a ocho dientes. También se tienen fresas con el filo de corte hasta el centro, las cuales permiten hacer mecanizados en penetración sin ningún agujero previo. (ver Figura 3.21)



Figura 3.21 Diferentes tipos de fresa tipo espiga

- El ángulo de la hélice: Cuanto mayor sea el ángulo de la hélice, el acabado a obtener será mejor. Por lo tanto, para acabados se recomiendan ángulos de hélice grandes y para desbaste y materiales no férreos, ángulos pequeños. Un ángulo de hélice de 40° con un gran ángulo de desprendimiento es muy adecuado para el mecanizado de aceros inoxidable y aceros de bajo carbono. Mientras para mecanizado de ranuras en general, es adecuado un ángulo de 30° . (véase en Figura 3.22)



Figura 3.22. Fresas tipo espiga con diferente ángulo de hélice

- El perfil de la hélice: Se tiene tres tipos de perfiles de hélice (ver Figura 3.23)
 - el perfil recto, el cual es liso a lo largo del diente y es utilizado principalmente para acabados.
 - el perfil plano, para semidesbastes.
 - y el perfil redondo, utilizado generalmente para desbastes.



Figura 3.23. Fresas tipo espiga con diferente perfil de hélice

Aunque cada vez se construyen herramientas más versátiles, como norma general, se puede decir que para conseguir un corte suave se debe de aumentar el número de dientes y el ángulo de la hélice, y el perfil de la hélice debe ser recto.

Como consecuencia de los continuos avances tecnológicos, la selección de los insertos y de la geometría del filo de corte para fresado ha mejorado el rendimiento de las herramientas. Muchas de los insertos tienen tres geometrías básicas para operaciones de mecanizado ligero, mediano y pesado.

Geometría para uso general M. La letra M es la que designa al inserto que se utiliza para operaciones de uso general. Es posible obtener una gran gama de cortes (ver Figura 3.24).

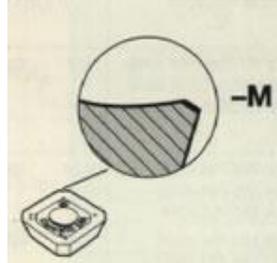


Figura 3.24. Inserto con geometría M para uso general

Geometría de corte ligero L. El inserto con geometría L es más afilada. Se utiliza en cortes ligeros que necesiten un buen acabado superficial. También se suele utilizar cuando la pieza no es muy rígida o el amarre es débil. Corta bastante bien los materiales suaves y minimiza la formación de rebaba. (ver Figura 3.25)

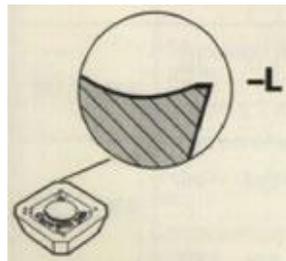


Figura 3.25 Inserto con geometría L para corte ligero

Geometría robusta H. Cuando se realizan mecanizados pesados (desbastes), se utiliza una geometría H, el cual tiene el filo reforzado. Soporta grandes profundidades de corte y elevados avances, (ver Figura 3.26)

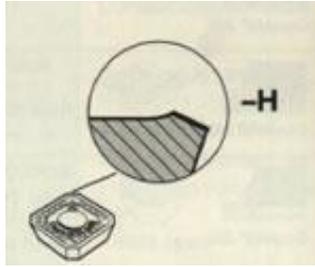


Figura 3.26. Inserto con geometría H para corte pesado

3.6 Materiales para herramientas de maquinado

Existe una gran diversidad de herramientas de corte utilizadas para el maquinado o fresado de aluminio. Las herramientas especiales tienen mayores ángulos de desprendimiento ayudando a que la evacuación de la viruta fluya mejor. La mayoría de las herramientas de filo múltiple como las fresas, tienen pocos dientes. Hasta los años setenta se utilizaban principalmente herramientas de acero tipo alta velocidad (high speed steels), hoy en día se ha pasado a utilizar herramientas a base de carburo de tungsteno con diferentes recubrimientos. En realidad, el material de la pieza a maquinar, es el factor más importante para seleccionar el tipo de herramienta de corte a emplear. Por eso, elegir el material de la herramienta es uno de los problemas más delicados ya que está estrechamente ligado a la velocidad de corte, y ésta a su vez depende de la temperatura a la que se someterá la herramienta, haciendo una correlación entre el material y tiempo de maquinado. Estos factores son tanto de índole técnica como económica. Los requisitos a considerar para la selección de las herramientas de corte son las siguientes [13, 19, 20]:

- **Dureza a elevada temperatura:** Un material para cortar a otro debe ser más duro, en los metales y aleaciones la dureza se reduce al elevarse la temperatura provocando ciertas limitaciones.

- **Resistencia al desgaste:** La vida útil de la herramienta está ligada a su geometría y al desgaste, hasta el punto de perder el filo efectivo, o llegar hasta el punto de fractura.
- **Resistencia:** Debe alcanzar valores que impidan la ruptura del filo por fragilidad, lo cual puede suceder en un corte ininterrumpido.
- **Coefficiente de fricción:** Es un requisito importante en un material de herramienta y debe ser lo más bajo posible.
- **Propiedades térmicas.** La conductividad tiene gran importancia al establecer rápidamente el equilibrio térmico en los puntos de mayor calentamiento en la pieza y las partes de la herramienta, así como también es importante tomar en cuenta el calor específico y el coeficiente de dilatación.

El tipo de materiales y los rangos de propiedades utilizados para las herramientas de corte son, (véase en Figura 3.27):

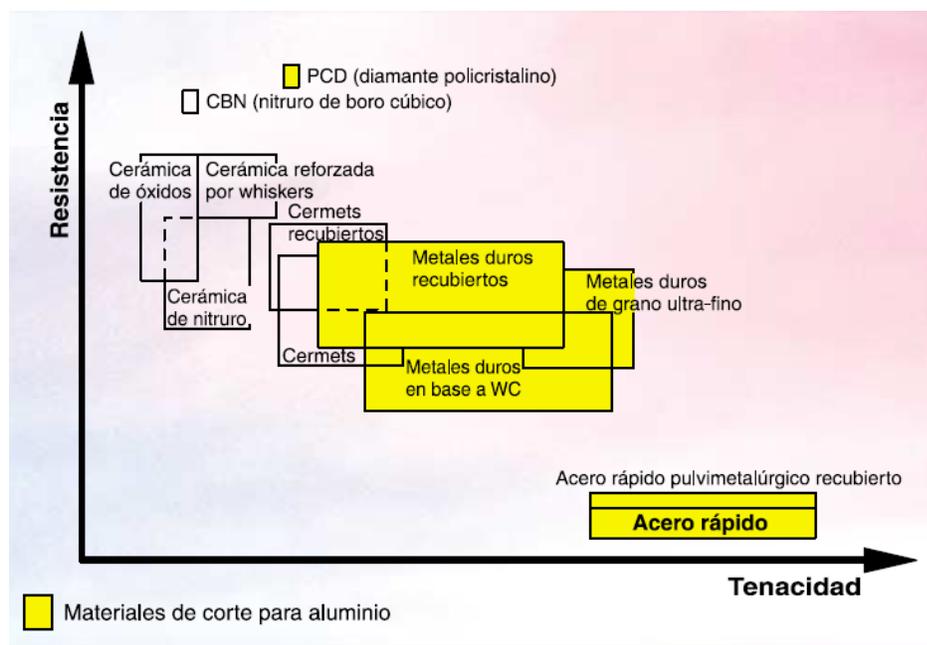


Figura 3.27. Representación esquemática de materiales para herramientas de corte [30]

Aceros al carbono: Poseen un contenido de carbono de 0.9 a 14%. Si están correctamente tratadas, estas herramientas poseen gran dureza, buena tenacidad y resistencia al desgaste, pero no pueden emplearse cuando trabajen a temperaturas superiores a 250 °C. Se emplean cuando se tienen producciones a pequeña escala, o en trabajos aislados, en operaciones de acabado a pequeña velocidad o trabajos muy delicados, y cuando se exige ángulos muy precisos [22].

Aceros aleados: Además del carbono contienen cromo, tungsteno, molibdeno y vanadio, entre otros elementos aleantes. En su mayoría se ablandan y desafilan a temperaturas superiores a los 250°C. Existen tres tipos principales [22]:

- **Indeformables.** Se emplean para la conformación de piezas de precisión. Se deforman menos que los aceros al carbono y poseen una resistencia al desgaste 6 veces mayor.
- **Al tungsteno.** Se emplean para la fabricación de brocas.
- **Semi-rápidos.** Las herramientas que contienen un 9 a 11% de tungsteno y 3.5 a 4.5 de cromo se emplean en la fabricación de cuchillas con rendimiento y velocidad de corte inferiores a las de los aceros alta velocidad.

Aceros alta velocidad (HSS): Trabajan a temperaturas de hasta 600°C manteniendo su dureza y filo inicial, lo cual permite disponer de velocidades de trabajo mayores que las de los demás aceros. Son apropiados para aleaciones de aluminio con bajo contenido en silicio. Permite el uso de grandes ángulos de desprendimiento para obtener unas mejores condiciones de corte. En el maquinado de aluminio con elevado contenido de silicio, el desgaste de este tipo de herramientas es acelerado. Estas herramientas se utilizan

principalmente en la industria metal-mecánica para el mecanizado de perfiles extruidos de aluminio [13, 22]. Estos aceros pueden ser recubiertos con carburo de tungsteno o carburo-nitruro de tungsteno para reducir la fricción durante el maquinado.

Estelitas: Son aleaciones base cromo-cobalto-tungsteno con bajos contenidos de otros elementos como hierro, carbono, silicio y manganeso. Se fabrican por vaciado de precisión a temperaturas superiores a 1300°C. Son insensibles a los tratamientos térmicos. Permiten trabajar los metales con velocidades superiores a la de los aceros rápidos ya que soportan temperaturas de hasta 700°C sin perder el filo. Tienen el inconveniente de ser más frágiles que estos últimos. Las estelitas son duras y muy resistentes tanto a bajas como a altas temperaturas. Las propiedades son resultado directo de su composición. El alto contenido de cromo las hace inoxidable, así como resistentes a muchos productos químicos corrosivos. El cobalto les aporta unas excelentes características antifricción, siendo especialmente resistentes a las deformaciones. El tungsteno, molibdeno y el cromo en forma de carburos, le dan dureza en frío, así como resistencia a la abrasión cuando la aleación está por encima de los 800°C. [13, 22].

Carburos metálicos: Los carburos metálicos sinterizados ofrecen la ventaja de una mayor duración de las herramientas. Están compuestos por carburos de tungsteno y un metal auxiliar generalmente cobalto que sirve de aglomerante. Hay otros tipos como los carburos de titanio, de tántalo y niobio, que son adicionados como aleantes. Se emplean en el mecanizado de aluminio con elevado contenido en silicio así como para los mecanizados a altas velocidades de corte. Las fundiciones de aluminio, con la presencia de cristales de silicio de elevada dureza requieren obligatoriamente el uso de herramientas de carburo metálico. Dentro de los carburos metálicos se tienen distintas gamas y calidades, en función de las condiciones de corte requeridas. Sus características principales son las de poseer muy elevada dureza, que se mantiene hasta temperaturas de 600°C. Alta resistencia a la compresión,

excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, baja resistencia al choque y conductividad térmica igual o superior a la de los aceros [13, 22].

Diamantes: Se caracterizan por su elevada duración y se emplean para mecanizar ebonita (resina plástica), determinados bronce, aleaciones de aluminio con un elevado contenido en silicio. Suelen emplearse para trabajos de maquinado en piezas que generen mucha viruta y para operaciones de acabado en la que se pueden obtener tolerancias de 2 micras con superficies mejor acabadas que con las rectificadoras. Tienen el inconveniente de la fragilidad del diamante, de ahí que su empleo quede limitado a pasadas continuas y en máquinas carentes de vibraciones. Los diamantes en forma de pastilla se montan en mangos de acero; y con el fin de disminuir riesgos de ruptura por ser altamente frágiles, no acaban en punta viva sino redondeada [13, 22].

Materiales cerámicos: Bajo la denominación de materiales cerámicos o cerámicas de corte, se pueden considerar [22]:

- **Cermets:** Son materiales sinterizados constituidos por un componente no metálico (óxidos, silicatos, carburos de silicio y de cromo) y por componentes metálicos de elevado punto de fusión, como molibdeno, cromo o vanadio. A la tenacidad propia de los metales se une un alto grado de refractariedad propio de los productos cerámicos. Los cermets que tienen mejores características de aplicación a las herramientas se obtienen por la sinterización de óxidos de aluminio, junto con carburos de molibdeno o vanadio [22].
- **Óxidos sinterizados:** El más apropiado para la fabricación de herramientas es el óxido de aluminio y alúminas sinterizadas casi puras. A este se añaden otras sustancias como óxido de cromo, de hierro o de titanio. La característica más destacable son, una conductividad térmica muy baja, una dureza superior a la de los carburos metálicos y un coeficiente de dilatación lineal parecido al de los aceros. Su

inconveniente es que tienen excesiva fragilidad. Se presentan en forma de plaquitas que se emplean soldadas a sus mangos con resinas epóxicas o bien sujetas por medios mecánicos. Se emplean en el torneado de fundiciones y aceros. También para mecanizar el cobre, sus aleaciones y metales ligeros. [22].

Nitruros de boro cúbico: Este es uno de los materiales más nuevos para herramientas. Se produce a elevadas temperaturas y presiones en presencia de un catalizador. La plaquita está constituida por un soporte de carburo con una fina capa de nitruro de boro cúbico. La dureza de este material es superada sólo por el diamante. Es frágil pero poco reactivo con la pieza. Su elevada estabilidad térmica le permite trabajar durante largos periodos de tiempo a temperaturas de 1,000 a 1,100°C. Con este material se pueden mecanizar ventajosamente las aleaciones de níquel a gran velocidad [22].

La vida de la herramienta está medida en base al tiempo efectivo o total de maquinado, a la longitud de corte o volumen de material removido, al número de piezas mecanizadas y la relación entre la velocidad de corte y la vida útil de la herramienta. Estos factores influyen directamente en la productividad de la maquina-herramienta y en los costos de maquinado. De ahí la importancia de mantener por el mayor tiempo posible el filo de las herramientas. Cuando el filo se deteriora, el acabado superficial del producto a maquinar se degrada. De esta manera, al detectar variaciones de calidad en su superficie, esto indicará un deterioro de la herramienta de corte.

Es importante mencionar los tratamientos térmicos de las herramientas de corte, ya que van a ayudar a que tengan mejor rendimiento. Las herramientas de acero siempre se templean y revienen para darles la dureza y

tenacidad adecuadas. Algunas veces las herramientas de aceros rápidos una vez templadas y revenidas, se someten a tratamientos superficiales como son la nitruración o la sulfatización para darles mayor dureza y resistencia al desgaste. También existe otro tratamiento superficial, el cromado duro el cual aumenta la resistencia al desgaste y disminuye el coeficiente de rozamiento. Pero se utiliza más para la restauración de herramientas desgastadas.

3.7 Fluidos y refrigerantes para maquinado

Los fluidos de corte se utilizan para reducir los efectos de fricción y de desgaste durante las operaciones de maquinado. Son esenciales para reducir el calor generado durante el corte. A las temperaturas elevadas que se desarrollan durante el maquinado, se puede afectar la microestructura, tanto de los metales a maquinar como el de las herramientas. Durante las operaciones de maquinado gran parte de la energía del proceso se transforma en calor, a pesar de que gran parte de este calor generado es extraído por la viruta y el fluido de corte, se ha estimado que cerca de un 20% del calor generado es absorbido por la pieza a maquinar y por la herramienta. Las funciones principales de los fluidos de corte es reducir la fricción donde hay contactos deslizantes, prevenir o reducir la adherencia de la viruta en la herramienta de corte, ayudar a prevenir la oxidación o la corrosión y absorber el calor generado por la acción de la fricción de los componentes y el calor adiabático del mismo proceso de corte y de la zona de deformación plástica. La selección y el uso adecuado de los fluidos de corte pueden ayudar, no solo a lograr estos objetivos, sino también a mejorar la calidad superficial, aumentar la velocidad de corte, tener mayor precisión al momento de cortar y una de las más importantes; incrementar la producción y disminuir los costos [23].

Una de las causas que favorecen el desgaste en las herramientas de corte es el incremento de la temperatura en los filos de corte, lo que reduce la

dureza en forma localizada y el material de la herramienta se desgasta rápidamente o incluso puede llegar a deformarse plásticamente. En un principio se pensó refrigerar la herramienta y la pieza empleándose chorros de agua lo que tiene un efecto considerable sobre la eficiencia de la refrigeración ya que al emplear agua dura, con un alto contenido de minerales, puede causar oxidación, manchas y corrosión de las máquinas y piezas, además de problemas de atascamiento de las bombas. En la actualidad, la lubricación del proceso de corte ha sido sujeto de grandes mejoras, llegando a desarrollar un gran número de lubricantes específicos para cada tipo de operación de corte y materiales involucrados. En la tabla 3 se detallan las ventajas del uso de lubricantes en el mecanizado, teniendo ciertas propiedades que se mencionan en la misma. [13, 20, 23].

Tabla 3. Ventajas de los fluidos de corte [13].

1.	Disminución de la fricción entre herramienta y pieza. Disminuyendo por tanto la potencia necesaria para el corte hasta en un 10%.
2.	Mantiene el filo a temperatura inferior a la de pérdida de sus propiedades de corte y disminuye las dilataciones y contracciones de las piezas.
3.	Permite aumentar la velocidad de corte hasta un 50%, obteniendo una mayor producción por unidad de tiempo.
4.	Permite aumentar el volumen de corte cuando no puede aumentarse la velocidad de corte, bien aumentando la profundidad o el avance de corte.
5.	Protege a la pieza contra la oxidación empleando lubricantes protectores adecuados.
6.	Limpia la pieza de partículas de corte y arrastra a la viruta.

Para obtener las ventajas antes señaladas los lubricantes o refrigerantes deben poseer varias propiedades, como son: viscosidad baja, elevado calor específico y buena conductividad térmica, ambos deben ser antioxidantes y anticorrosivos, con una débil tensión superficial para mojar bien la pieza y la

herramienta. Los tipos de lubricantes que reúnen estas propiedades se les denomina "aceites de corte" y estos son [23]:

- **Aceites puros:** Generalmente son aceites minerales aunque también se emplean aceites vegetales de viscosidad superior a la de los minerales, o bien aceites mixtos entre minerales, vegetales y animales (grasas). Estos aceites se emplean cuando se desea que las cualidades lubricantes prevalezcan sobre las refrigerantes.
- **Aceites con aditivos:** A los aceites puros se les adiciona azufre libre o combinado. El azufre reduce la soldabilidad del material sobre la cuchilla y mantiene la lubricación hasta presiones de 13.0 MPa. Estos aceites poseen el inconveniente de que no se pueden emplear, en general, en metales no férreos ya que producen manchas en las piezas.
- **Aceites solubles:** Se emplean emulsiones o soluciones en agua, que debe ser agua tratada o de baja dureza. Las emulsiones se preparan con aceites minerales emulsificados en agua.

El éxito de la lubricación del corte depende de seleccionar adecuadamente el lubricante que se va a utilizar y a mantener un balance correcto de volumen de lubricante en la sección de corte, abarcando la pieza a maquinar, la herramienta y la rebaba.

La eficiencia del sistema de los fluidos de corte está determinadas por:

- El tipo, composición, microestructura, tratamiento térmico y dureza del material a maquinar o a cortar.
- El diseño, la rigidez y las condiciones de operación de la máquina-herramienta.
- La velocidad, avance y profundidad de corte.

- El tipo, composición, acabado, recubrimiento y geometría de la herramienta de corte.
- El modo de aplicación del fluido.
- La geometría del material a mecanizar, incluyendo tolerancias, precisión y rugosidad esperada.
- La distribución de tensiones residuales en la pieza de trabajo.

El conocimiento de las funciones del líquido de corte, tipo, limitaciones físicas, y su composición, juegan un papel importante en la selección y aplicación del fluido apropiado para una situación específica de mecanizado. Las funciones, la química, el control de la aplicación, el reciclaje, y la eliminación de los líquidos de corte son importantes para un mecanizado productivo. También se deben considerar las implicaciones para la salud y la biología de los fluidos de corte [23].

Las funciones de los fluidos de corte incluyen la lubricación y el enfriamiento, de manera que las fuerzas de fricción y la temperatura se reducen en la interface herramienta-pieza de trabajo. En las operaciones de corte de alta velocidad, la refrigeración proporcionada por el fluido de corte es la función más importante. A velocidades de corte moderadas, tanto el enfriamiento como la lubricación son importantes. Sin embargo, a bajas velocidades, la lubricación se convierte en la función dominante de un fluido de corte. La conformación de la viruta y la adhesión en el filo de corte se relacionan con los efectos de la fricción entre pieza y herramienta. La figura 3.28 muestra un esquema de la operación de corte con una herramienta de un solo filo. La herramienta se mueve a una velocidad V y a una profundidad de corte t_o para crear una rebaba espesor t_c que es mayor que t_o . La rebaba es generada en un plano de corte (o cizallamiento) que forma un ángulo ϕ con la dirección de corte. Este ángulo, conocido como el ángulo de inclinación, es una variable muy importante en la mecánica de formación de viruta. El ángulo de alivio o de salida, es también

importante porque proporciona acceso potencial a la zona de corte para la lubricación [23].

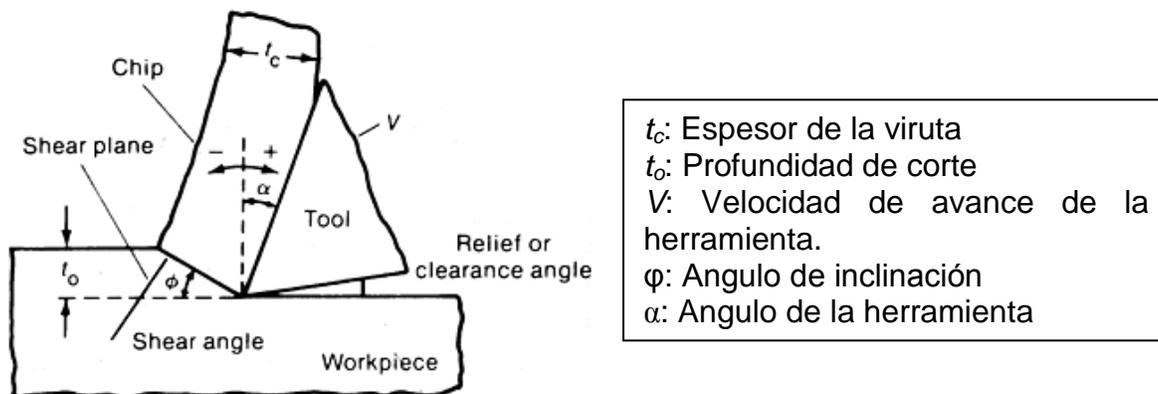


Figura 3.28. Dibujo esquemático del proceso de corte utilizando una herramienta de un solo filo [23].

Considerando el potencial para mejorar el proceso de corte con un fluido de corte, la figura 3.29 muestra las principales áreas de deformación y la fricción que se producen durante la generación de la rebaba. En la zona 1 de esta fig. 3.29 se indica el área de endurecimiento por deformación que se forma en el material a cortar, por delante de la herramienta. En esta zona puede presentarse micro-grietas y una relativamente elevada temperaturas puede resultar como resultado de la deformación y del endurecimiento por deformación. En la zona 2, la rebaba se desplaza fuera de la zona de cizallamiento y se desliza sobre la superficie de la herramienta. Conforme la rebaba se desliza sobre la superficie de incidencia de la herramienta, se genera más calor como resultado de la fricción entre la rebaba y la superficie de la herramienta. En la zona 3, como la herramienta se desliza sobre la superficie recién cortada, se genera más frotamiento de la herramienta contra el material de la pieza, provocando más fricción y más deformación en el plano sub-superficial. Conforme se va generando la rebaba, sobre el filo de la herramienta

se genera una zona de adhesión, zona 4, la cual crea más deformación plástica localizada y fricción. En la zona 5, por debajo de la zona principal de remoción del metal, se genera una zona adicional de deformación plástica y de endurecimiento por deformación. La geometría de las rebabas depende del tipo del material de la pieza y de las condiciones de corte [23].

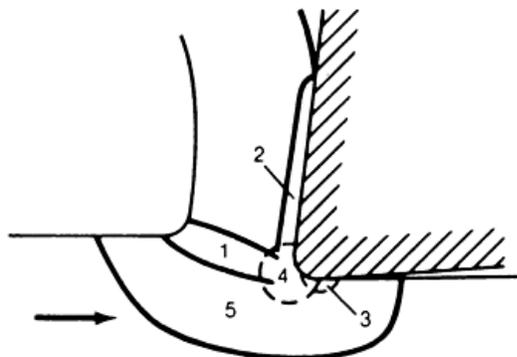


Figura 3.29. Dibujo esquemático de las zonas de fricción y deformación durante la formación de una rebaba. Las zonas numeradas se explican en el texto. Ref. [23].

3.7.1 Lubricación.

Los líquidos de corte mejoran la vida de la herramienta y permiten mayores velocidades de corte mediante la reducción de la fricción que se produce durante el proceso de corte. Los líquidos de corte, con buenas cualidades de lubricación también pueden:

- Permitir la formación de viruta continua cuando bajas velocidades de corte son empleadas.
- Reducir las fuerzas de fricción entre la herramienta y la cara de incidencia.

- Reducir el tamaño, o en algunos casos eliminar la zona de adhesión en el filo de la herramienta. La eliminación total de la zona de adhesión producirá un acabado mas fino en la pieza a maquinar y resultará en menor fricción en la superficie de corte.
- Reducir el desgaste adhesivo mediante la reducción de la adherencia entre la herramienta y la pieza de trabajo [23].

3.7.2 Enfriamiento

Los líquidos de corte reducen la temperatura durante la operación de corte por medio de una transferencia de calor desde el pieza de trabajo y la herramienta, hacia el fluido. Algunos de los factores implicados en la refrigeración son los siguientes:

- El enfriamiento de la pieza de trabajo mantiene frio al material y se conserva la resistencia mecánica del mismo, sin necesidad de variar las fuerzas necesarias para el corte del metal. Generalmente, este efecto es mínimo para la mayoría metales.
- Los efectos de enfriamiento de producido por los fluidos de corte pueden ser perjudiciales si el cambio de temperatura causado en la herramienta de corte es abrupta. Los cambios bruscos de temperatura pueden provocar la fractura y desportillamiento de la herramienta. Las herramientas a base de cerámicos o cer-mets son particularmente sensibles a este choque térmico.
- El enfriamiento de los fluidos de corte está generalmente relacionado con sus propiedades térmicas. En general, la eficiencia de enfriamiento es menor para un aceite que para una emulsión y es mayor con emulsiones en agua. Sin embargo, los efectos sobre la fricción pueden ser alterados, ya que las propiedades lubricantes pueden influir en la cantidad del calor generado o extraído.

- La eficiencia del enfriamiento puede ser reducida por las características de transferencia de calor de los fluidos de alta viscosidad. Las velocidades de corte altas, inicialmente puede mejorar la refrigeración porque la viscosidad del fluido de corte disminuye con temperatura, pero más allá de una cierta temperatura este efecto se revierte.
- La eficiencia del enfriamiento depende de la cantidad de superficie en contacto con el fluido, la viscosidad del fluido, la reactividad química, el tamaño molecular, y las características físicas del flujo del fluido [23].

3.7.3 Características Químicas de los Fluidos de Corte

Generalmente, los líquidos de corte son de dos tipos: soluciones y emulsiones. Las soluciones constan de un fluido base tal como aceite de petróleo, solventes a base hidrocarburos, un fluido sintético, o agua. Estos fluidos base pueden ser formulados con diversos aditivos que son solubles en el fluido. Emulsiones, por otro lado, se componen de dos fases: una fase continua que consiste generalmente de agua, y una fase discontinua que consiste en pequeñas partículas de aceite, petróleo o fluido sintético suspendidas en el agua. A estas emulsiones se les denominan comúnmente como aceites solubles. El aceite y las soluciones sintéticas generalmente tienen las más altas capacidades lubricantes y las más bajas eficiencias de refrigeración. Las soluciones en agua, por otro lado, tienen las más altas eficiencias de enfriamiento y menor eficiencia en lubricación. En general, las emulsiones tienden a tener propiedades moderadas tanto para la lubricación como para la refrigeración [23].

3.7.4 Aceites de corte.

Los aceites de corte o para rectificado están formados, ya sea por un aceite a base de naftalinas, un aceite a base de parafinas, o a base de un disolvente de hidrocarburos, como el ingrediente principal. Los aceites minerales a base de parafina difieren de los aceites a base de naftalinas en dos aspectos principales. En primer lugar, los aceites de parafina tienen una concentración mucho más alta de átomos de carbono de cadena lineal que varían mucho en longitud, y segundo, que tienen una menor concentración de compuestos cíclicos, tales como naftalinas y compuestos aromáticos policíclicos. Los aceites de parafina exhiben mayor resistencia a la oxidación que los aceites de naftalina y tienden a mantener su viscosidad durante un intervalo de temperatura más amplio. Por el otro lado, los aceites de naftalina tienden a formar soluciones más estables que los aditivos de aceites de parafina. En los aceites de naftalina, los compuestos aromáticos forman una superficie activa y por lo tanto proporcionan una mejor capacidad de soportar carga. Todos los aceites minerales contienen una gran variedad de compuestos de anillos o de cadena larga de peso molecular variable [23].

3.7.5 Fluidos sintéticos.

Los fluidos sintéticos tienen una estructura molecular controlada con propiedades predecibles. Hidrocarburos sintéticos, tales como las polialfaolefinas se han usado para remplazar el aceite mineral en algunas aplicaciones especiales de maquinado. Alcoholes de cadena larga también han sido utilizados para aplicaciones especiales [23].

3.7.6 Soluciones base de agua.

Las soluciones a base de agua son a menudo denominadas "productos sintéticos" en la industria. Las soluciones a base de agua tienen una excelente transferencia de calor debido a la alta capacidad calorífica de agua. Sin embargo, la pureza del agua puede afectar significativamente el rendimiento de estas soluciones a base de agua. El ataque biológico, la formación de espuma, desplazamiento del aditivo, y la formación de depósitos son algunas de las consecuencias de la concentración de minerales u otras impurezas que pueden estar presentes en el agua [23].

3.7.7 Emulsiones.

Las emulsiones consisten de líquidos inmiscibles que forman una mezcla relativamente estable a causa del uso de emulsificadores o productos químicos surfactantes (que son solubles en los fluidos). Las emulsiones para el corte de metales consisten principalmente en una fase continua de agua conteniendo partículas suspendidas de aceite mineral o de aceite sintético. El tamaño de las partículas del fluido suspendido varía y depende de la eficacia de los productos químicos surfactantes utilizados para emulsificar el sistema. Emulsiones claras pueden ser producidas cuando la fase suspendida consiste de partícula de tamaño suficientemente fino, pero en la mayoría de los casos las emulsiones tienen un color blanco lechoso, blanco-azulado o blanco-verdoso, dependiendo del tipo de los aditivos químicos utilizados. En estos casos, el tamaño de las partículas es más grande.

En general, cuando los productos surfactantes adecuados son añadidos a un par de líquidos inmiscibles, tal como aceite y agua, los surfactantes serán absorbidos en la interface entre los dos líquidos. El grupo hidrófilo, es decir, la parte de la molécula del surfactante que es soluble en agua, se orientará por si

misma con el fin de formar parte de la fase del agua, y la porción lipófila o de aceite miscible de la molécula se orientará con el fin de formar parte de la fase aceite. Existe un gran número de agentes surfactantes disponibles para la formulación de líquidos y fluidos de corte. En general, se utiliza una combinación de emulsionantes y surfactantes. Jabones de cadena larga, ácidos grasos, ésteres de fosfato, sulfanatos, y alcoholes etanoxiatados se usan frecuentemente en proporciones adecuadas como componentes de un sistema de emulsión-surfactante [23].

3.7.7.1 Estabilidad de las Emulsiones.

La estabilidad de las emulsiones es muy importante en las operaciones de corte de metales, de tal manera que hay que evitar la desestabilización de una emulsión. La desestabilización ocurre a menudo debido a la acumulación de minerales debido a las frecuentes adiciones de agua dura, industrial o municipal, y a la acumulación de virutas de la operación de mecanizado. La adición inadvertida de limpiadores o suciedad pueden también romper la emulsión.

Cuando se produce el rompimiento de la emulsión, generalmente resulta en la formación de dos líquidos diferentes: agua y el aceite flotando en la parte superior. Sin embargo, un fenómeno conocido como “nata” puede producirse también, que produce una capa o nata espesa que flota en la superficie. Esta capa no es tanto un resultado de la ruptura de la emulsión, sino más bien es el producto de la formación de dos emulsiones separadas. La emulsión en la parte superior tiene una concentración mucho mayor de partículas de aceite en suspensión. La presencia de la nata puede indicar que un proceso de ruptura de la emulsión está a punto de empezar [23].

3.7.8 Aditivos.

Los aditivos proporcionan o incrementan ciertas propiedades en los fluidos de corte, algunos de los más importantes son:

3.7.8.1 Aditivos para soportar Presión Extrema (PE).

Estos compuestos químicos varían considerablemente en estructura y composición, y son lo suficientemente reactivos con los metales que están en proceso de maquinado que pueden formar compuestos relativamente débiles en la interface entre la herramienta y la pieza de trabajo. Los aditivos de presión extrema sirven como lubricantes sólidos con baja energía de enlace y por tanto reducen la fricción entre la herramienta y la pieza. Estos aditivos están formulados principalmente como compuestos de azufre o sulfatos (tales como éters de ácidos grasos sulfurados), compuestos a base de cloruros (por ejemplo, hidrocarburos clorados o ésters clorados), aditivos a base de fósforo (como éters de ácido fosfórico). Lubricantes sólidos tales como el bisulfuro de molibdeno también se ha utilizado en pequeñas cantidades. Estos lubricantes sólidos se depositan sobre la superficie metálica y reducen la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo. Boratos se han utilizado para el mismo propósito. Sin embargo, las moléculas orgánicas con azufre y cloro son los aditivos PE más utilizados. Las reacciones químicas que se producen durante la formación de sulfuros o cloruros como un resultado de la interacción entre la pieza de trabajo y el aditivo son muy complejas y aún son materia de investigación [23].

3.7.8.2 Detergentes.

Compuestos tales como alcoholes de cadena larga, ácido bencénico sulfatado y ácidos sulfatados de petróleo puede reducir o prevenir la formación de depósitos sobre la superficie maquinada de la pieza de trabajo [23].

3.7.8.3 Aditivos para prevenir la formación de niebla.

La contaminación del aire por los fluidos de corte ha sido un problema que cada día se le da más importancia. Es más crítico cuando se utilizan soluciones a base de aceite. La adición de pequeñas cantidades de acrilatos o poli-butanos reducirá la formación de niebla mediante la generación de partículas de aceite más grandes, que son más pesadas y mucho más difícil que difundan al aire formando nieblas de aceite [23].

3.7.8.4 Aditivos Antiespumantes.

La espuma ocurre generalmente cuando la agitación del fluido, ya sea por la operación de corte o por el manejo del fluido, introduce aire en el líquido. Para evitar o minimizar la formación de espuma, la energía libre de la superficie de la película debe ser reducida. Agentes antiespumantes se han desarrollado para este propósito. Poly-alka-oxisiloxanes, sílice desecada, amidas de alto peso molecular y poliglicoles son eficaces en la mayoría de los fluidos de corte de metal [23].

3.7.8.5 Filtros de olor.

Las altas temperaturas alcanzadas en la interfaz de la herramienta y la pieza de trabajo llagan a calentar el fluido y a menudo da lugar a malos olores

que son desagradables para los operarios. El aceite de pino, aceite de cedro, y otras esencias aromáticas se han utilizado para enmascarar estos olores, haciendo así el fluido más aceptable en operaciones a largo plazo[23].

3.7.8.6 Inhibidores de la corrosión.

La corrosión que pudiera presentarse en la pieza de trabajo, pero sobretodo en las herramientas, mecanismos y componentes del centro de maquinado puede ser un problema severo, sobretodo en líquidos o emulsiones a base de agua. Sulfatos, boratos, y benceno-triazoles se han utilizado como aditivos en los fluidos de corte para ayudar a prevenir la corrosión. Muchas aminas orgánicas y sulfatos, que proporcionan protección contra la corrosión, pueden servir a otro propósito - el de proveer características surfactantes eficientes, así como la protección contra la corrosión [23].

3.7.8.7 Colorantes.

Tanto en los aceites como en las soluciones solubles, se pueden utilizar colorantes para ayudar a la identificación del fluido de corte y para ayudar en la identificación de la ubicación del fluido con respecto a la técnica de aplicación [23].

3.7.8.8 Agentes antimicrobianos.

El crecimiento microbiano normalmente toma lugar en los fluidos de corte que contienen agua. Las bacterias, hongos, y moho crecerán, dependiendo de las condiciones de crecimiento y la competencia por alimento entre estos organismos. Los sulfatos inhibidores de bacterias producen el conocido "olor del lunes por la mañana." Estos microbios no requieren de aire y crecen en el fondo

de los sumideros y contenedores, atacando el azufre en los aditivos PE, o el azufre presente en los aceites de corte. Esto produce compuestos de azufre complejos y característicamente, malolientes. Existe un considerable número de biocidas disponibles para ser usados en atacar y matar las bacterias, moho y hongos [23].

3.8 Selección de fluidos de corte para metales

La selección de un fluido de corte para metales depende de la evaluación de un gran número de factores interrelacionados. Algunos de los factores pertinentes no tienen nada que ver con la operación de maquinado de un metal en particular, sino más bien tiene que ver con la facilidad de limpieza de la parte después de ser maquinada, el costo de reciclar el fluido, el costo de la eliminación segura y controlada de los fluidos, la posibilidad de efectos adversos sobre la salud y seguridad de los operadores y finalmente el costo y la disponibilidad del fluido de corte .

Sin embargo, los criterios técnicos del proceso de maquinado también deben ser tomados en cuenta para la selección de un fluido de corte. Estos criterios incluyen las tolerancias especificadas, la rugosidad o acabado superficial especificado, la vida de la herramienta y el consumo de energía. Los líquidos también deben ser no corrosivos para el equipo, dispositivos, herramientas y para la parte que se está mecanizando. La elección de un fluido de corte está influenciada por las características del propio fluido, el material de la pieza a trabajar y la operación de maquinado específica [23].

3.8.1 Características de los fluidos de corte.

Las soluciones a base de aceite poseen características superiores de lubricación, resistencia al ataque de bacterias, protección de superficies contra

la corrosión y pueden ser fácilmente reciclados con el uso de filtros apropiados. Las soluciones a base de agua tienen una capacidad superior de enfriamiento y son generalmente más económicos en cuanto a costos de operación y su costo de reciclado puede ser menor debido a la facilidad de la sedimentación de las virutas y rebabas. Las emulsiones de aceite y agua tienden a tener características intermedias de enfriamiento y lubricación en comparación con los de soluciones de aceite y agua [23].

3.8.2 Material de la pieza de trabajo.

La maquinabilidad o facilidad de maquinado de los metales pueden variar considerablemente dentro de una misma composición específica debido a variaciones en la estructura y a su homogeneidad. Sin embargo, hay algunas recomendaciones generales en la selección de un fluido de corte para una familia de materiales o aleaciones, tal como se describe a continuación [23].

3.8.2.1 Aceros *inoxidables*.

Se recomienda el uso de aceites con viscosidad baja con aditivos de cloruros, así como aditivos para PE a base de sulfuros. Las emulsiones que contienen sulfuros y cloruros son fluidos de corte muy eficaces a altas velocidades de corte.

3.8.2.2 Aleaciones de aluminio.

Se recomiendan soluciones a base de agua que contengan ésteres de ácidos grasos y amidas. También se recomiendan aceites ligeros que contengan ésteres grasos, especialmente para operaciones de torneado y fresado.

3.8.2.3 Aleaciones de titanio.

Se recomiendan aceites ligeros que contengan aditivos PE clorados. Las emulsiones que contienen cloro han sido efectivas para operaciones de rectificado con ruedas de carburo de silicio.

3.8.3 Operaciones de Maquinado

Cada una de las operaciones de corte de metal tiene características que a menudo influyen en la eficacia de un fluido de corte en particular. Los métodos de maquinado por corte de metal básicos son: torneado, fresado, taladrado y rectificado [23].

- **Torneado.** Debido a que la herramienta de corte está en contacto continuo con la pieza de trabajo, el acceso a la zona de corte está restringido. Por lo tanto, los fluidos de corte de elección son aquellos con un fluido base y aditivos de bajo peso molecular. En general, soluciones a base de agua soluciones y emulsiones son las más recomendadas para la mayoría de las operaciones de torneado.
- **Fresado.** La lubricación es generalmente más importante que el enfriamiento en este tipo de maquinado, debido a la relativamente baja velocidad de corte involucrada y el fácil acceso a la herramienta de corte. Por lo tanto, aceites compuestos y emulsiones son frecuentemente las más recomendadas.
- **Taladrado.** Debido a que la herramienta (brocas) está en contacto continuo con la pieza en espacios muy cerrados, y a la dificultad de acceder a la zona de corte, brocas con canales de lubricación son necesarias cuando sea posible. Las soluciones a base de aceite y a base

de agua pueden ser útiles si se utilizan aditivos de azufre y cloro, aunque los detalles específicos de la química de los fluidos son fuertemente influenciados por la composición del material que se está mecanizando. Por ejemplo, el uso de aditivos a base de cloro, no parece ser eficaz en la mejora de la perforación de los aceros libre maquinado.

3.9 Métodos de Control y Prueba de los Fluidos de Corte

El control y las pruebas aplicables a los fluidos de corte han sido propuestas por varios organismos de estandarización, ente ellos los más importantes son los propuestos por la Sociedad Americana para Pruebas de materiales (ASTM por sus siglas en inglés). La Tabla 4 enumera algunas de las especificaciones y normas estándar de la ASTM, utilizadas con mayor frecuencia para establecer el control y las pruebas aplicables a los líquidos de corte de metales [23].

Tabla 4. Normas ASTM aplicables a fluidos para corte de metales [23].

Norma	Título
D 88	Saybolt viscosity
D 92	Flash and fire points by Cleveland open cup
D 94	Saponification number of petroleum products
D 129	Sulfur in petroleum products (general bomb method)
D 130	Detection of copper corrosion from petroleum products by the copper strip tarnish test
D 273	
D 445	Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and the Calculation of Dynamic Viscosity)
D 446	Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers
D 808	Chlorine in new and used petroleum products (bomb method)
D 811	Chemical analysis for metals in new and used lubricating oils
D 892	Foaming characteristics of lubricating oils
D 893	Insolubles in used lubricating oils
D 974	Acid base number by colour-indicator titration
D 1317	Chlorine in new and used lubricants (sodium alcoholate method)
D 1401	Emulsion characteristics of petroleum oils and syntetic fluids
D 1479	Emulsion stability of soluble cutting oils
D 1662	Active sulfur in cutting fluids
D 1748	Rust protection by metal preservatives in the humidity cabinet
D 2711	Demulsibility characteristics of lubricating oils
D 2782	Measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (Timken Method)
D 2783	Measurement of extreme-pressure properties of lubricating fluids (Four-Ball Method)
D 3233	Measurement of extreme-pressure properties of lubricants (Falex pin and vee block Method)
D 3324	
D 3342	Dispersion stability of new (unused) rolling oil dispersions in water
D 3601	Foam in aqueous media (bottle test)
D 3705	Misting properties of lubricating fluids
D 3707	Storage Stability of water-in-oil emulsions by the Oven Test Method
D 3709	Stability of water-in-oil emulsions under low to ambient temperature cycling conditions
D 3946	Evaluating the bioresistance of water-soluble metal working fluids
D 4172	Wear preventive characteristics of lubricating fluid (Four-Ball Method)
D 4627	Iron chip corrosion for water-dilutable metalworking fluids
D 5183	Determination of the coefficient of friction of lubricants using the Four-Ball Wear Test Machine
IP 19	Demulsification number

3.9.1 Viscosidad

La viscosidad es la propiedad más importante de un lubricante. La viscosidad de un fluido determina sus características de flujo, penetración, y el espesor de película de aceite. En general, hay dos mediciones básicas de la viscosidad, estas son: absoluta o viscosidad dinámica, y la viscosidad cinemática. La viscosidad dinámica representa la fuerza requerida para vencer la fricción del fluido. La viscosidad cinemática mide la viscosidad en relación a la densidad del fluido. La viscosidad cinemática se utiliza generalmente para caracterizar a los lubricantes. La viscosidad cinemática es expresada generalmente en, ya sea centistokes (cSt) o Segundos Universales Saybolt (SUS). Las especificaciones ASTM D 445 y D 446 describen la instrumentación y la técnica para medir la viscosidad cinemática. Viscosímetros de diversos diseños permiten el flujo bajo condiciones controladas, y este flujo se traduce en la viscosidad a una temperatura especificada. La especificación ASTM D 88 describe un método que utiliza un viscosímetro Saybolt Universal. El método también mide el flujo de un fluido a una temperatura específica. Aunque esta técnica no es tan precisa como las descritas en las normas ASTM D 445 y D 446, es adecuada para la mayoría de las aplicaciones.

3.9.2 Concentración.

Durante el proceso, los distintos aditivos se van gastando o agotando a diferentes velocidades, dependiendo de las muchas variables observadas durante el maquinado de metales, tales como la composición química del material a maquinar, la concentración de los aditivos, la concentración de sales en las soluciones a base de agua, la temperatura y la velocidad de producción. Este cambio en la composición y la concentración del fluido puede resultar en una vida de la herramienta corta, tolerancias de maquinado variables, la

degradación de acabado superficial, la producción de piezas oxidadas, y el crecimiento de bacterias, moho y hongos en el fluido.

La adición selectiva de los diferentes aditivos puede ser necesaria si el agotamiento de los componentes específicos del lubricante no es compensada por adiciones periódicas del concentrado. En general, la concentración puede ser controlada mediante el uso de un refractómetro, por medio el fraccionamiento de la emulsión, o por la valoración de las soluciones a base de agua. El parámetro de operación más importante para las soluciones o emulsiones a base de agua es la concentración de los ingredientes activos en relación con el diluyente acuoso. El control de estas concentraciones es imperativo si las características de operación del fluido de corte deben ser consistentes. Debido a que la composición química del agua utilizada en la dilución del concentrado es a menudo una variable no-controlable, la determinación de la concentración puede ser un problema recurrente.

Generalmente, el uso de un refractómetro para medir la concentración es adecuado durante la preparación inicial del fluido. Sin embargo, con mucha frecuencia se puede convertir en poco funcional, conforme se van acumulando los contaminantes o se incrementa la concentración de sales en el agua del fluido. Con frecuencia, el método más eficaz y confiable para determinar la concentración de una emulsión dada es disociar una muestra de la emulsión, mediante la adición de sales iónicas o pequeñas adiciones de ácidos. Una muestra de la emulsión es seleccionada, se retiran los sedimentos y contaminantes sólidos (restos de virutas) y se adiciona una pequeña cantidad de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La disociación ocurre después de que la mezcla es calentada durante aproximadamente 1 hora. Después de este tiempo, dos capas separadas se forman: una conteniendo el aceite y los aditivos y la otra capa es de agua. Esta técnica de disociación distorsiona la concentración de aceite y aditivos en la emulsión. Sin embargo, información muy útil sobre la concentración puede ser

obtenida con esta técnica o sus variaciones. La titulación de las emulsiones se basa generalmente en una titulación colorimétrica de las emulsionantes aniónicas utilizadas con frecuencia en producir las emulsiones. Si se ha utilizado un sulfonato de petróleo como emulsionante, este se puede titular con una hiamina mediante un indicador catiónico (azul de metileno). La titulación también puede ser utilizar como un método de control para soluciones a base de agua debido a que estas soluciones tienen una variación en su pH de 8.5 a 9.5. La titulación con un ácido mineral diluido a un valor pH predeterminado puede ser comparado con un estándar para establecer un equivalente alcalino que se eleve con un cambio en el pH del fluido de corte. El uso constante de este tipo de equivalencias de la concentración y titulación, pueden ser útiles para controlar las concentraciones de la solución.

3.9.3 Estabilidad de la emulsión.

La estabilidad de las emulsiones puede ser afectada por bajas temperaturas en los periodos sin operación, por temperaturas muy altas durante la operación, por la contaminación del fluido de corte por otro tipo de aceites residuales, o por virutas o partículas finas del metal a ser maquinado, o por una inadecuada formulación. El tamaño de las partículas y su distribución pueden a menudo considerarse como indicadores de la estabilidad. Tamaños de partícula grande pueden ser deseables en algunas operaciones de corte, sin embargo en otras condiciones indican una incipiente ruptura de la emulsión. El tamaño y la distribución de las partículas pueden ser observadas en un microscopio óptico de bajos aumentos. La observación regular y el registro sistematizado sobre el tamaño de partícula y su distribución pueden servir como una técnica de control adecuada.

El exceso de calor o frío deben evitarse ya que pueden dar lugar a una emulsión inestable. Determinación de la estabilidad de las emulsiones frescas

es importante en la caracterización de un nuevo fluido de corte y para establecer una línea base contra la cual se puedan comparar los procedimientos de análisis posteriores. Una prueba de pérdida de estabilidad basada en la norma ASTM D 1479 puede ser útil a este respecto. Después de dejar una muestra en reposo por 24 horas para su sedimentación, se extraen 20 ml de la parte inferior de la muestra de emulsión preparada. Esta emulsión es disociada y su concentración se compara con la obtenida al disociar una muestra tomada antes del período de 24 horas de sedimentación.

3.9.4 Formación de Espuma

Las espumas se forman como resultado de la agitación producida por la operación de maquinado o por la transportación de fluido. La producción de espuma puede reducir la resistencia de la película efectiva, dificultar el asentamiento de las virutas finas y disminuir la transferencia de calor. La especificación ASTM D 892 es un método para evaluar la tendencia relativa de formación de espuma de un fluido en particular. Se sumerge un difusor de aire en una muestra del fluido y un se hace pasar un flujo de aire predeterminado por un período de tiempo dado. El volumen resultante de espuma es medido. La muestra se deja en reposo y el volumen de espuma que permanece se registra. La espuma que queda después de un tiempo de reposo de 10 minutos es generalmente una indicación confiable de la estabilidad de la espuma. La prueba se repite utilizando una mayor temperatura. El volumen relativo de espuma es una medida de la tendencia espumante del fluido de corte. Los efectos de contaminantes durante el procesamiento también pueden ser evaluados con este método.

3.9.5 Partículas contaminantes.

Como resultado de las operaciones de corte de metal, las partículas metálicas finas y los contaminantes orgánicos procedentes de diversas fuentes se pueden acumular en el fluido. Estas partículas influyen en la vida de la herramienta y en el acabado superficial del material a maquinar. También pueden facilitar la descomposición química de las especies moleculares del fluido de corte. La especificación ASTM D 273 describe un procedimiento de filtrado que puede ser utilizado para medir la concentración de partículas bajo condiciones controladas.

3.9.6 Concentración de iones hidrógeno

La concentración de iones de H_2 se puede medir mediante el uso de papel pH o por medio de un medidor de pH estándar. Debido a la relativa simplicidad de los métodos de medición, el monitoreo regular del pH puede ser realizado para medir el cambio general en la acidez o en la alcalinidad del fluido de corte, en forma continua mientras duren las operaciones de corte. Un cambio en el pH puede reflejar la degradación química o una degradación debido al crecimiento de especies biológicas. En operaciones dentro de un taller de maquinado, la medición sistemática y continua de pH es un procedimiento relativamente simple para controlar la calidad de los fluidos de corte.

3.9.7 Corrosión.

Una de las más importantes características de los fluidos de corte a base agua, es su potencial de corrosión. Existen varios métodos de prueba, relativamente sencillos, que han sido desarrollados para medir la tendencia de los fluidos a producir manchas o corrosión. Una de ellas es la norma ASTM D

4627. Virutas de fundición de hierro gris que han sido previamente lavadas y posteriormente cubiertas con el fluido a caracterizar, pueden ser monitoreadas fácilmente, bajo condiciones controladas de temperatura y tiempo, para observar y detectar la tendencia hacia el manchado o corrosión. Pruebas similares pueden ser realizadas sobre cupones o probetas de cobre, aluminio o aleaciones ferrosas (aceros). Gabinetes con humedad relativa controlada, de diseños variables, también son frecuentemente utilizados para evaluar la tendencia hacia el manchado o la corrosión de los diferentes fluidos de corte. Algunos gabinetes también pueden incorporar la aplicación controlada de contenidos específicos de diferentes sales o condensación de vapor de agua.

3.9.8 Pruebas Biológicas.

Microbios tales como bacterias, moho y hongos, no solo pueden promover la corrosión de las máquinas-herramienta, de las herramientas de corte y de las piezas a trabajar. Sino que también pueden afectar la salud de los operarios, pueden producir dermatitis o infecciones en las vías respiratorias. Adicionalmente, las bacterias y hongos, pueden desestabilizar las emulsiones. Diferentes técnicas son empleadas para evaluar la presencia y la concentración de estos micro-organismos en los fluidos de corte. Existen tres familias principales de evaluación. Los métodos por liberación de oxígeno, los métodos por inmersión de plaquitas de crecimiento y por medio de la medición de la concentración de amonio. Estas pruebas son relativamente sencillas de realizar y pueden monitorear adecuadamente la presencia de contaminación por micro-organismos de los fluidos de corte.

El método de liberación de oxígeno consiste en la detección y medición del oxígeno liberado por la contaminación microbiana. Se han diseñado equipos de detección de oxígeno liberado a partir de la conversión enzimática de un substrato de peróxido en oxígeno y en agua. El oxígeno es liberado por los

microbios formados en el fluido de corte y es detectado y cuantificado por este tipo de instrumentos. Este método entrega resultados muy precisos, confiables, repetitivos en corto tiempo y es un método muy eficaz para monitorear la presencia de micro-organismos en los fluidos de corte.

En los métodos de crecimiento por inmersión de plaquitas, se utilizan diferentes plaquitas de plástico recubiertas con un gel nutritivo y son sumergidas por un tiempo determinado en el fluido de corte. Se extraen y se dejan por un tiempo para que drenen el exceso de fluido. Los micro-organismos presentes en el fluido crecerán en el gel. Existen diferentes tipos de gel para los diferentes tipos de bacterias, moho u hongos. Recientemente se han desarrollado plaquitas con diferentes tipos de gel en cada una de sus dos caras. Una cara detecta el crecimiento de bacterias y la otra cara detecta el crecimiento de moho. A pesar de que no es un método cuantitativo, es un método sencillo, de bajo costo y muy práctico para el monitoreo de fluidos de corte en estaciones grandes de almacenamiento para un gran número de estaciones de maquinado, en ambientes industriales.

El método de concentración de amonio puede detectar niveles excesivos de bacterias y microbios. Se utiliza un método de medición directa de la concentración de amonio empleando medidores de pH instrumentados con un electrodo de inmersión iónico, diseñado y calibrado para medir la concentración de amonio.

3.9.9 Calidad del Agua.

Para el caso de los líquidos de corte a base de agua, es de suma importancia evaluar y controlar la calidad y composición química del agua utilizada. Agua dura (alto contenido de carbonatos) y bajos niveles de pH afectaran adversamente la estabilidad de las emulsiones. El control de la

concentración de aniones, cationes, y el pH refleja el control de la calidad del agua. Cationes tales como magnesio, aluminio y calcio son especialmente importantes porque influyen en la formación de jabones en agua dura. También tiene efectos significantes en la degradación de los surfactantes utilizados en las emulsiones. Si los surfactantes son degradados, pierden su efectividad. Las altas concentraciones de sal en el agua reducen la estabilidad de las emulsiones y soluciones. La dureza total del agua se expresa generalmente en términos del carbonato de calcio (CaCO_3) que puede ser determinada por titulación.

3.9.10 Residuales.

Los residuos que quedan después de que el agua se ha evaporado en los fluidos a base de agua, pueden causar diversos tipos de problemas, entre ellos, atascamiento de las partes móviles de la maquina-herramienta, desalineación de las herramientas y corrosión a largo plazo. En general, los residuos deben ser suaves y no pegajosos para mantener su eficacia lubricante. Un método sencillo para evaluar las características de los residuos, consiste en hacer evaporar una cantidad específica del fluido en un recipiente plano, tal como un plato de Petri, y posteriormente inspeccionar visualmente los residuos para evaluar su viscosidad, fluidez, color, cristalización y concentración.

3.9.11 Conductividad Eléctrica.

La conductividad eléctrica de un fluido de corte a base de agua puede ser utilizada como una medida de la acumulación de sales o de impurezas metálicas. Una serie de mediciones de conductividad realizadas durante un determinado tiempo, puede ser empleada para determinar los ciclos de limpieza

adecuados o de cambio de los fluidos de corte. Existen diferentes equipos de medición para determinar la conductividad eléctrica intrínseca de los fluidos de corte.

3.10 Rebaba

El proceso de fresado ha logrado significantes avances en los últimos años, lo cual ahora permite no solo eliminar material a gran velocidad, sino también el de controlar las variables para tener mejores resultados. Una de estas variables es la gran diversidad de formas y dimensiones de la rebaba (también conocida como viruta). La morfología de la rebaba puede llegar a perturbar el proceso del maquinado, ya que si no se logra la eliminación rápida y fluida de las rebabas de la zona contacto de la herramienta con el material de trabajo, se corre el riesgo de tener una fuerte acumulación de virutas largas y fibrosas en el área de mecanizado que, una vez que forman masas enmarañadas, afectarán el proceso, la calidad y el costo del proceso.

La forma de la viruta se debe principalmente al material que se está cortando y puede ser tanto dúctil como frágil. También influyen los parámetros propios del proceso de maquinado como son el avance, la profundidad y la velocidad de corte, aunadas a la geometría de la herramienta, los diferentes ángulos de ataque, así como la incorporación de rompe-virutas en los insertos intercambiables. Estos factores suelen determinar la morfología y dimensiones de la viruta según las condiciones de maquinado y del material a trabajar. Estas formas se observan en la Figura 3.30 [24, 26]:

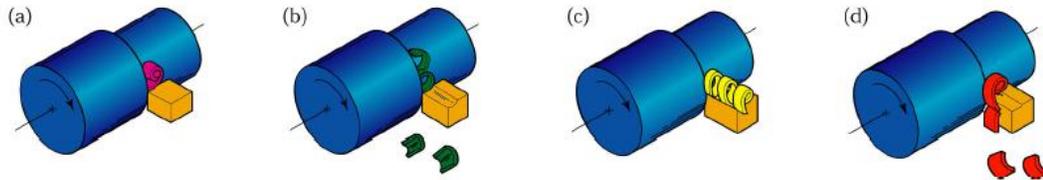


Figura 3.30. Formas típicas de viruta. a) de cortadura. b) escalonado. c) continua. d) fraccionada

- a) Viruta de cortadura, se obtiene al trabajar metales duros y poco dúctiles a bajas velocidades de corte, como el acero endurecido.
- b) Viruta escalonada, se forma al trabajar aceros de dureza media, o aleaciones de aluminio con velocidad media de corte. Esta representa una cinta con la superficie lisa por el lado de la cuchilla y dentada por la parte exterior.
- c) Viruta fluida continua, se obtiene al trabajar aceros blandos, cobre, plomo, estaño y otros metales no ferrosos con altas velocidades de corte.
- d) Viruta continua fraccionada, se forma al cortar materiales poco plásticos y consta de trocitos separados, como el hierro colado y bronce.

Aparte de los tres principales parámetros de mecanizado, es decir, velocidad de corte, avance y profundidad de pasada, a continuaci[on se describen las variables que se dan particularmente en el fresado y que influyen en la forma de la viruta [?].

La primera variable es la sección y espesor de la viruta, en la cual va a haber una gran relación entre el avance y la profundidad de corte. Por esta relación, se definirá la sección de la viruta que arranca cada diente en el fresado, es diferente entre los dos principales tipos de fresado anteriormente descritos, ver sección 3.2.

En el fresado frontal, la sección de viruta que arranca un diente es función del avance por diente (F_z) y de la profundidad de pasada (A_p), (ver la Figura 3.31).

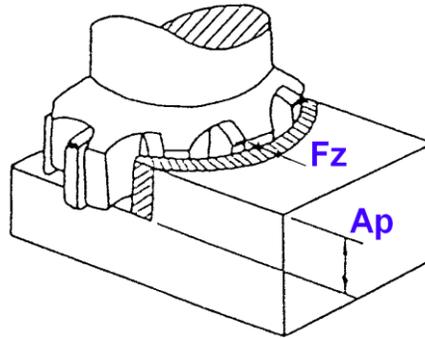


Figura 3.31. Fresado Frontal

Así, podemos definir la sección para el fresado frontal, como:

$$S = A_p \times F_z$$

Donde:

- S = Sección de viruta (mm^2).
- A_p = profundidad de pasada (mm).
- F_z = avance por diente (mm)

En cambio en el fresado periférico, la sección de viruta arrancada por diente se define por la relación entre el ancho de pasada (a_e) y el espesor (h_x , espesor máximo y h_m espesor medio) de la viruta arrancada. El espesor de viruta, se define teniendo en cuenta el diámetro de la fresa, la profundidad de pasada y del avance por diente. (ver Figura 3.32)

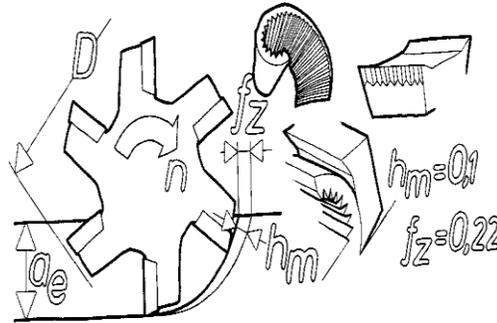


Figura 3.32. Fresado periférico

De esta manera podemos definir la sección de viruta en el fresado periférico como:

$$S = a_e \times E$$

Donde:

S= Sección de viruta (mm^2)

a_e = Ancho de corte (mm)

E= Espesor de viruta (mm)

$$E = \cos \alpha \times F_z$$

$$\sin \alpha = R - h_m / R$$

Donde:

F_z = Avance por diente (mm)

R = Radio de la fresa (mm)

$a_p = h_m$ = Profundidad de pasada (mm)

El control de la sección y el del espesor de la viruta son factores importantes a la hora de determinar el proceso de mecanizado. Cuanto menor sea el espesor de la viruta en el momento del arranque, la carga del filo será menor y esto nos permitirá aplicar mayores velocidades de avance por diente

sin dañar al mismo, teniendo que reducir la profundidad de corte debido a los menores ángulos de posicionamiento de los filos.

El control de viruta va a depender principalmente de tres factores que son: la potencia de la máquina, la fijación o el sistema de amarre de la pieza y la sección del mango de la herramienta así como de la sujeción de insertos y su propia geometría.

Como es lógico, el aumento de la sección y espesor de viruta, entre otras variables, implica un aumento de la potencia necesaria para que se realice el arranque de material.

La segunda variable es el volumen de material arrancado (Q) y potencia de corte (Pc). El primero se refiere a la cantidad de metal arrancado por unidad de tiempo (cm³/min) y se obtiene al multiplicar el ancho de pasada, la profundidad de pasada y la velocidad de avance.

De esta manera,

$$Q = \frac{a_e \times a_p \times v_f}{1000}$$

Donde:

- Q = volumen de arranque de viruta (mm³/min)
- a_e = ancho de pasada (mm)
- a_p = profundidad de pasada (mm)
- V_f = velocidad de avance (mm/min)

La potencia de corte (P_c), es calculada multiplicando el volumen de arranque de viruta por la fuerza específica de corte. Esta fuerza específica de corte (K_c), es una constante que se determina por el tipo de material que se está mecanizando, geometría de la herramienta, espesor de viruta, entre otros.

Para poder obtener el valor de potencia correcto, el valor obtenido tiene que dividirse por un determinado valor (ρ) que tiene en cuenta la eficiencia de la máquina. Este valor es el porcentaje de la potencia del motor que está disponible en la herramienta puesta en el husillo.

$$P_c = \frac{a_e \times a_p \times V_f \times K_c}{(60 \times 10^6) \rho}$$

Donde:

- P_c = Potencia de corte (kw)
- a_e = ancho de corte (mm)
- a_p = profundidad de pasada (mm)
- V_f = velocidad de avance (mm/min)
- K_c = fuerza específica de corte (N/mm²)
- ρ = rendimiento o eficiencia

De esta forma podremos saber cuál es la potencia necesaria para realizar el mecanizado y poder ajustar las diferentes variables para poder obtener el máximo rendimiento de la máquina y la herramienta que se utilizan en dicho mecanizado.

La tercera de las variables son los brazos de palanca de la pieza y de la herramienta. Este es un factor que se debe tener en cuenta para que no surjan problemas en cuanto a la calidad superficial que se desea obtener, ya sea que se afecte por las vibraciones y esfuerzos generados por las diferentes fuerzas de corte.

De esta manera el brazo de palanca de la pieza es la distancia que hay entre el punto de corte y el punto de amarre de la pieza más cercano al de corte. Cuanto menor sea este brazo de palanca, menor será la tendencia de la pieza a moverse y de esta manera se consigue un mejor amarre de la pieza, lo que nos permitirá trabajar con condiciones más severas de trabajo (profundidades de corte, avances, velocidades de corte) sin que aparezcan problemas de vibraciones, desajustes en el amarre, entre otros.

Por otra parte conviene tener en cuenta también el brazo de palanca de la herramienta. El brazo de palanca de la herramienta es la distancia que hay entre el punto de corte y el punto de amarre de la herramienta más cercano al de corte. Cuanto menor sea este brazo de palanca, menor será la tendencia de la herramienta a moverse y obtendremos una herramienta más robusta que nos permitirá utilizar condiciones de corte más severas sin que se produzcan vibraciones.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, se podrían estimar los márgenes en los que se pueden ajustar las diferentes variables a fin de definir el procesos de maquinado más adecuado y poder obtener las piezas requeridas, cumpliendo con las especificaciones solicitadas, de la manera más óptima y a menor costo.

Es complicado definir todos los parámetros apropiados de corte en un proceso de maquinado. Como se ha comentado anteriormente, el fresado es un procedimiento de maquinado extremadamente versátil y por ello cada tipo de operación tiene sus peculiaridades, teniendo en cuenta los ángulos y geometría de la herramienta, inclinación de cabezal, posición de fresa en el mecanizado, entre otras. Todas estas variables están directamente relacionadas entre ellas y se deben tener en cuenta a la hora de definir un proceso correcto.

Existe una forma de calcular el tiempo de mecanizado en una fresadora. Se toma en cuenta la longitud de aproximación que depende del tipo de fresado y las salida de la fresa de la pieza a maquinar. Por ejemplo en el planeado, la longitud de aproximación coincide con la mitad del diámetro de la herramienta; en el fresado de ranuras es diferente y depende de la profundidad de la ranura y del diámetro de la fresa; y en el fresado por contorneado interior o exterior las longitudes de mecanizado dependen del diámetro de la fresa y de la geometría de la superficie contorneada. El tiempo de mecanizado puede calcularse a partir de la siguiente ecuación.

$$T_m = \frac{\text{Longitud de aproximación (mm)} + \text{Longitud de la pieza(mm)}}{V_f}$$

Donde:

- T_m = es el tiempo de mecanizado (min)
- V_f = es la velocidad de avance. (mm/min)

3.11 Maquinado de aleaciones de aluminio

La maquinabilidad de las aleaciones de aluminio-silicio depende fuertemente del contenido de silicio. En las aleaciones de bajo contenido de Si, la aleación es suave y tienden a formar adherencia en la superficie de la herramienta, debido a su bajo punto de fusión. Las aleaciones hipo-eutécticas que contienen más del 5% de silicio son aleaciones maleables. El maquinado es difícil, no tienen el mismo acabado brillante que las aleaciones endurecidas, sino más bien un acabado gris con algo de lustre. Las aleación eutécticas son las que tiene la microestructura ideal para maquinar, estas aleaciones poseen buenas propiedades mecánicas a temperatura ambiente, pero no son tan resistentes a elevadas temperaturas. Por otra parte, las aleaciones hiper-

eutécticas que contiene más del 12% de silicio son las más difíciles de maquinar debido a que la microestructura está formada por granos masivos de Si puro en una matriz de mezcla eutéctica aluminio más silicio. Los granos de Si reducen la maquinabilidad drásticamente ya que actúan como partículas muy duras y abrasivas, lo que incrementa el desgaste y la fractura de herramientas con mayor facilidad.

La mayoría de las aleaciones de aluminio bajo ciertas condiciones se puede maquinar a alta velocidad sin sacrificar la vida de la herramienta. El maquinado a alta velocidad (HSM) permite remover el material más rápidamente y a su vez reduce el tiempo del ciclo del maquinado, ayudando a incrementar la productividad y bajar los costos [25, 26].

La maquinabilidad de las aleaciones de aluminio cambia de acuerdo a los tratamientos térmicos, estructuras metalúrgicas, y dependiendo del material a utilizar, debido a que presentan mejores características de maquinado.

Según el tipo de aleación de aluminio estas pueden ser de fácil o difícil maquinado. Los aluminios puros son difíciles de maquinar ya que son muy suaves y en lugar de cortar el material en forma de viruta, este tiende a adherirse al filo de la herramienta. Como se mencionó anteriormente, las aleaciones híper-eutécticas Al-Si son difíciles de maquinar, ya que los cristales de Si actúan como partículas duras que erosionan el filo de corte de la herramienta. Dentro de este espectro de diferentes aleaciones base aluminio, se encuentran todos los grados de dificultad en la siguiente tabla 5, calificándolos como 5 con mayor dificultad para maquinar y con 1 con la menor dificultad [23].

Tabla 5. Maquinabilidad relativa de aleaciones de aluminio. (1) fácil de mecanizar. (5) difícil de mecanizar

Grupo		Tipo de aleación	Maquinabilidad relativa
Al puro		Al 99.9	5
Aleaciones de forja	No endurecibles	Al Mn	4-5
		Al Mg	3-5
		Al Mg Mn	3-4
	Endurecidas	Aleaciones para tornos automáticos	1-2
		Al Mg Si	3-4
		Al Cu Mg	2-3
		Al Cu Si Mg	3
		Al Zn Mg Cu	2
Aleación de fundición		G- Al Si	3
		G - Al Si Mg	2-3
		G - Al Si Cu	2
		G - Al Mg	2
		G - Al Mg Si	2
		G - Al Cu Ti	2
		G - Al Si Cu Mg Ni	2-3
		G – Al Si híper	5

El aluminio, en general da lugar a virutas continuas, pero, en algunas circunstancias pueden aparecer virutas astilladas o de otras formas irregulares no deseadas. Cuando se mecaniza aluminio puro o aleaciones forjadas blandas, se genera una viruta voluminosa e irregular debido al gran ángulo de desprendimiento, mientras que las aleaciones forjadas duras producen una viruta rizada y discontinua. Los aluminios de fundición, sin embargo, suelen producir virutas astillosas, rotas e incluso en forma de aguja. (ver Figura 3.33).

Machinability rating	Alloy	Speed, m/min (sfm)	Feed, mm/rev (in./rev)	
			Left photo	Right photo
A	2011-T3	120 (400)	0.066 (0.0026)	0.152 (0.0060)
B	2024-T4	30 (100)	0.152 (0.0060)	0.264 (0.0104)
C	6061-T6	120 (400)	0.152 (0.0060)	0.264 (0.0104)
D	3004-H32	120 (400)	0.152 (0.0060)	0.264 (0.0104)
E	1100-H12	120 (400)	0.152 (0.0060)	0.264 (0.0104)

Figura 3.33. Clasificación de virutas típicas para maquinado de aleaciones de aluminio del rango A a E. Todas las virutas se hicieron con la herramienta a 20° y 2.54 mm de profundidad de corte.

Referencias

- [1] ASM International. *ASM Handbook*. Vol. 16. *Machining*. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997.
- [2] G.Castro. *Técnicas Modernas de Mecanizado. Parte I. Facultad de Ingenieria. Universidad de Buenos Aires, Argentina. 2009.*
- [3] G.H. Garza-Elizondo. *Machining of Al-7-11%Si Casting Alloys: Role of Free Cutting Elements. M.E. Thesis. University of Quebec. Canada. August 2010.*
- [4] *The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25. Pereira, Adriana Ana, Boehs, Lourival y Guesser, Wilson Luiz. 2006, Journal of Material Processing Technology 179, págs. 165-171.*
- [5] *Comparative Machinability of Brasses, Steels and Aluminum Alloys. Thiele, Eugene y al., et. CDA Universal Machinability Index.*
- [6] *Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision-making method. Rao, V. 2006, International Journal of Advanced Manufacturing Technology Volume 28, págs. 221-227.*
- [7] *The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25. Pereira, Adriana Ana, Boehs, Lourival y Guesser, Wilson Luiz. 2006, Journal of Material Processing Technology 179, págs. 165-171.*
- [8] *Comparative Machinability of Brasses, Steels and Aluminum Alloys. Thiele, Eugene y al., et. CDA Universal Machinability Index.*
- [9] G.T. Smith, "Drilling and Associated Technologies," in *Cutting Tool Technology: Industrial Handbook*, Springer, London, 2008, pp. 33-142.
- [10] J.L. Jorstad, "Influence of Aluminum Casting Alloy Metallurgical Factors on Machinability," *Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA. 15096, 1980, 15p.*
- [11] V.A. Tipnis, R.A. Joseph, "Testing For Machinability," *Influence of Metallurgy on Machinability, ASM Materials/Metalworking Series No. 7, American Society for Metals, Materials Park, OH, 1973, pp. 11-30.*
- [12] E.M. Huseyin, O. Cuneyt, "Drill Wear Monitoring Using Cutting Force Signals," *Mechatronics, Vol. 14, 2004, pp 533-548.*

- [13] *Maquinabilidad*
<http://www.sitenordeste.com/mecanica/maquinabilidad.htm>
- [14] J.L. Jorstad, "Machinability of 380 Alloy: Effect of Minor Elements and Impurities, "Transactions of the Society of Die Casting Engineers, Paper No.G-T79-072, 1979.
- [15] M. Tash, "Effect of Metallurgical Parameters on the Machining Behaviour of 356 and 319 Alloys (Drilling and Tapping Study)," PhD, Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2005.
- [16] Blog de Ingeniería de Materiales – Categoría Materiales Metálicos
<http://ingenieriademateriales.wordpress.com/category/materiales-metalicos/>
- [17] *ASM Handbook, Vol 2, Properties and Selection. Non/Ferrous Alloys. 10^ª Edition, ASM International. E. U 1992*
- [18] Rao, Ventaka. *Machinability Evaluation of Work Materials. Decision Making in the Manufacturing Environment. s.l. : Springer London, 2007, págs. 81-95.*
- [19] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997. Chapter "Milling" pp 653-716.*
- [20] *MECANIZADO EN FRESADORA*
http://concurso.cnice.mec.es/cnice2005/2_mecanizado_fresadora/curso/index.htm#
- [21] *Seco Tools España S.A. en:*
<http://www.secotools.com/es/Global/About-Us/>
- [22] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997. Chapter "Cutting Tool Materials" pp 109-217*
- [23] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997. Chapter "Cutting Fluids" pp 244-268*

- [24] ASM International. *ASM Handbook. Vol. 16. Machining.* ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997. Chapter "Mechanics of Chip Formation" pp 18-28
- [25] J.E. Wyatt, J.T. Berry, "A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171, 2006, pp. 132-140.
- [26] H.A. Kishawy, M. Dumitrescu, M.A. Elbestawi, "Effect of Coolant Strategy on Tool Performance, Chip Morphology and Surface Quality during High-Speed Machining of A356 Aluminum Alloy," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, 2005, pp. 219-227.
- [27] NEMAK. Private communication from Machining Process Dept.. Nematik, Mexico. Enero 2012.
- [28] Ingeniería de Sistemas y Automática Tecnología de Fabricación y Tecnología de Máquinas (<http://isa.umh.es/asignaturas/tftm/Tema%2013-2%20Fresado%20.pdf>)
- [29] *Diferentes tipos de fresas* (<http://image.cimindustry.com/a/shallow-doc-and-high-speed-toolpaths-combine-to-maximize-metal-removal-high-feed-miling.jpg>)
- [30] A. Pérez-Unzueta. *Curso de Materiales para Diseño.* FIME UANL México. 2010.

CAPÍTULO 4

DISEÑO CONCEPTUAL DE UN DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DE MAQUINADO

El estudio de la evaluación de la maquinabilidad puede ser un factor clave para tener un mejor desempeño en los procesos de manufactura de componentes de alto rendimiento. Esta visión, es la base para que los investigadores de la empresa Nematik, junto con los investigadores de la FIME-UANL amplíen un estudio sobre la evaluación de la maquinabilidad de una nueva generación de aleaciones de Al-Si desarrolladas para ser utilizadas en los monoblocks de motores de combustión interna. Este estudio permitirá mejorar la productividad, minimizar el tiempo de producción e incrementar la eficiencia de los procesos de maquinado.

La importancia de esta investigación para la ciencia e innovación tecnológica consiste en poder desarrollar un procedimiento simple, sistemático, lógico y conveniente que permita a la industria evaluar la maquinabilidad de los nuevos materiales de manera eficiente y efectiva. En este capítulo se fincarán las bases para un diseño de un dispositivo experimental de maquinado, el cual en una segunda etapa se llevará a su construcción, permitiendo evaluar la maquinabilidad y poder correlacionar las propiedades mecánicas con los parámetros microestructurales de las diferentes aleaciones de aluminio.

4.1 Conceptualización

El proceso de maquinado es una operación imprescindible cuando queremos optimizar los aspectos económicos de un proceso de producción [1]. Dependiendo de la aplicación del proceso se tienen que utilizar ciertos valores para medir fraccionalmente los parámetros de maquinado, como son la vida de la herramienta, velocidad de corte (V_c), avance (V_f), profundidad de pasada, el consumo de potencia, el acabado superficial, entre otros más. Uno de los problemas que aún existe en la actualidad, es que no se tiene suficiente información para evaluar la maquinabilidad de diferentes aleaciones. Se han desarrollado numerosas pruebas de maquinado limitadas solo a considerar las propiedades de ciertos materiales. Aún no se tiene un estudio amplio de las nuevas aleaciones que se están desarrollando continuamente. Este proyecto se enfocará en las aleaciones de aluminio-silicio híper-eutécticas con modificación en la micro estructura [2, 3].

En la actualidad existe una fuerte tendencia en optimizar el uso de energéticos y de minimizar el impacto ambiental por la emisión de contaminantes de productos de combustión interna. Una manera de lograr esto es por medio del uso de materiales más ligeros. Como lo es el aluminio y sus aleaciones que tienen mayor resistencia, dan un mejor rendimiento de trabajo y son de suma importancia para la industria automotriz y aeronáutica.

La industria automotriz en la actualidad busca incrementar la eficiencia de los motores de combustión interna, reducir el peso de los vehículos, incrementar el rendimiento de combustibles y minimizar la emisión de contaminantes. Esto por medio del desarrollado de nuevos materiales como los son las nuevas aleaciones de aluminio silicio hiper-eutécticas.

Un ejemplo de estos nuevos desarrollos es la patente de una nueva aleación de aluminio híper-eutéctica (patente US2010/ 0288461) que contiene 13-14% de Si, 2.3-2.7% de Cu y tiene una modificación en la microestructura. Esta nueva aleación tiene buenas propiedades de castabilidad y tribológicas [4]. Pero en cuanto a su maquinabilidad, aún no ha sido evaluada, en parte por la falta de una metodología confiable para este tipo de nuevas aleaciones.

Precisamente, la necesidad de evaluar la maquinabilidad de este nuevo tipo de aleaciones y compararla con la maquinabilidad de las aleaciones Al-Si convencionales es la motivación detrás de este proyecto. Su objetivo a largo plazo, como quedo descrito en la introducción del presente trabajo, es desarrollar una metodología que permita la evaluación del maquinado de nuevas aleaciones de Al-Si y proponer los códigos de maquinado para diferentes aleaciones, bajo diferentes condiciones microestructurales. Para lo anterior, el primer paso es el diseño de un dispositivo de evaluación del maquinado, y en particular del fresado.

Con el desarrollo de este dispositivo, se espera contribuir en la propuesta de una metodología de maquinado para el proceso de fresado de las aleaciones de Al-Si modificadas. El sistema va a consistir de una mesa instrumentada en dos ejes que nos permita determinar las fuerzas necesarias para maquinar en forma eficiente las nuevas aleaciones, conociendo la cantidad y morfología de las fases presentes y así proponer los parámetros de maquinado óptimos.

Las aleaciones Al-Si se pueden representar en un diagrama de fases binario tal como el que se muestra en la Figura 4.1 [4]. Este diagrama muestra un punto eutéctico a 12% de Si y 577 °C. Las aleaciones con menor contenido de la composición eutéctica son llamadas hipo-eutécticas. Las aleaciones con mayor contenido de la composición eutéctica son llamadas híper-eutécticas.

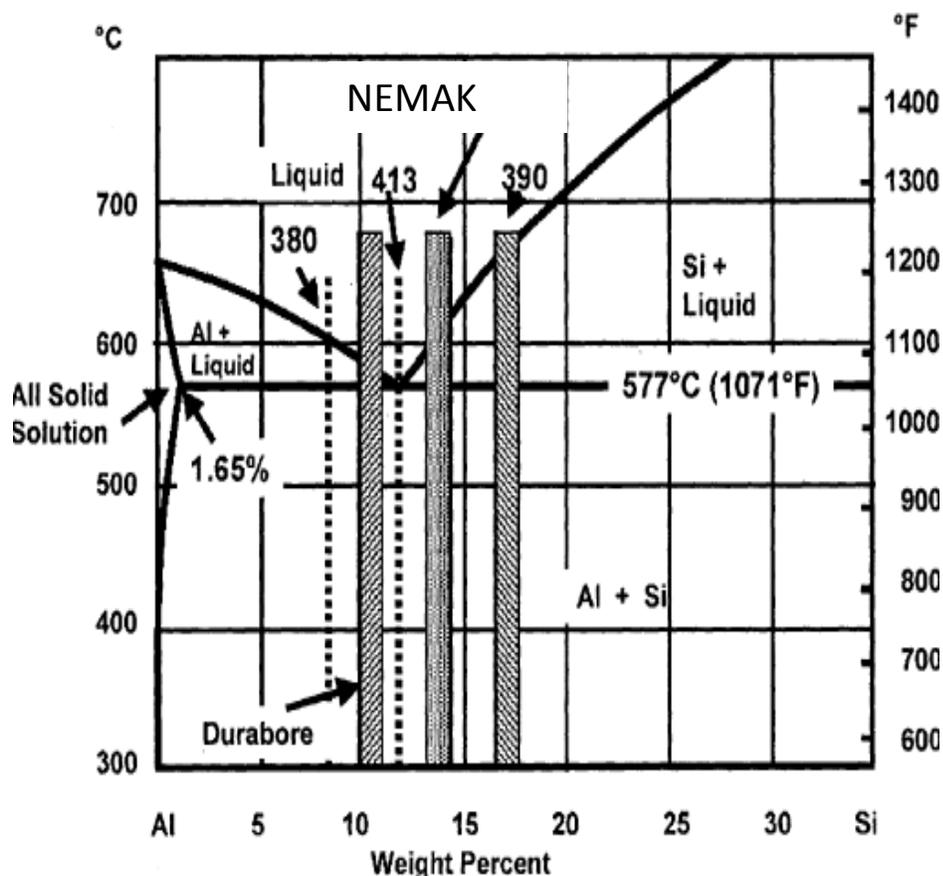


Figura 4.1 Sistema binario Al-Si hasta 35% de Si [4].

En este diagrama también se muestran algunas aleaciones que se han desarrollado para uso en motores de combustión interna. Entre ellas la 380 (9% de Si), Durabore (10 a 11 % de Si), 390 (16 a 17 % de Si), y la aleación NEMAK con (13 a 14 % de Si). Estas dos últimas son hiper-eutécticas.

Sin embargo, la empresa Nemak, ha trabajado con aleaciones hipo-eutécticas, eutécticas y hiper-eutécticas [5]. En la Figura 4.2 se muestra el diagrama de fase Al-Si completo, mostrando las microestructuras de las diferentes aleaciones de Aluminio-Silicio [6].

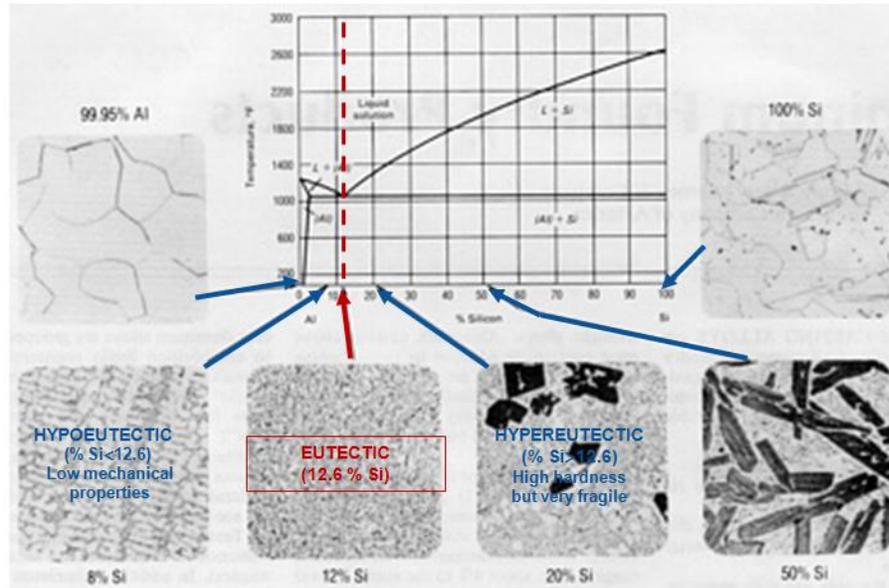


Figura 4.2 Sistema binario Al-Si hasta 35% de Si [6].

En cuanto a la maquinabilidad de estas aleaciones, cuando se tiene aluminio casi puro, la aleación es muy suave y “chiclosa” haciendo que se adhiera a los filos de las herramientas y dificultando la operación de corte. Las aleaciones Al-Si, hipo-eutéticas, es decir con contenidos de Si menores a 12%, la matriz esta formada por aluminio casi puro (fase α), con pequeños granos de fase eutética ($\alpha + \text{Si}$). Esta matriz de α , hace que las aleaciones sean blandas y al momento de cortarlas va a ser difícil. Estas aleaciones se han aplicado para la producción de monoblocks automotrices, pero debido a su baja resistencia al desgaste, es necesario la utilización de camisas o cilindros de aleaciones base hierro (hierro fundido o acero), ver la Figura 4.3 [7]. Estas camisas son llamadas “liners”.

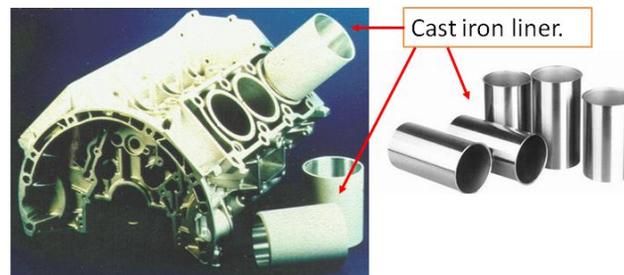


Figura 3. Monoblock de aleación de aluminio hipo-eutética con incrustación de liners de hierro [7].

El uso de camisas de hierro fundido generan algunos problemas que no han podido ser resueltos, entre ellos es peso. Al ser aleaciones base hierro, su densidad es alta. Otro problema importante es la diferencia en la dilatación térmica entre la aleación de aluminio y la camisa de hierro. Esto ha provocado una unión deficiente entre el aluminio y la camisa, lo que compromete al diseño. Finalmente, la interface aluminio-hierro no tiene una buena transferencia de calor como las aleaciones de aluminio, comprometiendo la eficiencia de extracción de calor de los cilindros. Estas dos últimas desventajas, tienen efectos sinérgicos negativos. Una diferencia en la dilatación térmica que provoque un espacio libre entre la interface Aluminio-Hierro, puede generar una zona de baja transferencia de calor, conocidos como “puntos calientes” y provocar, desde una operación poco eficiente del motor, hasta una falla catastrófica, ver Figura 4.4 [8].

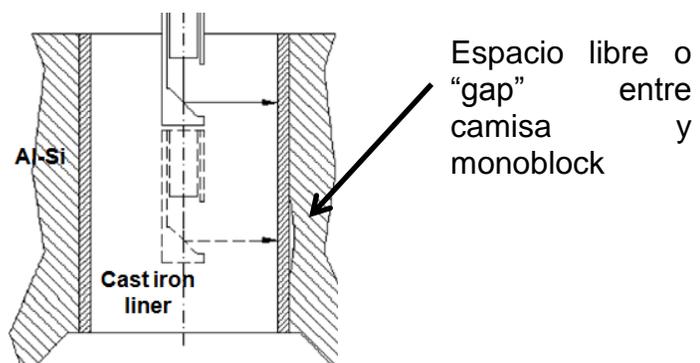


Figura 4.4. Interface entre monoblock y liner presentando un espacio libre [8].

Uno de los objetivos que se está buscando al desarrollar las nuevas aleaciones híper-eutécticas Al-Si, es que éstas puedan soportar la mecánica de alto contacto y alto desgaste en el movimiento recíproco entre los anillos de presión del pistón y la camisa del cilindro. Este contacto mecánico está caracterizado por una alta presión de compresión anillo-pared. Lo anterior genera altos esfuerzos cizallantes en la interface anillo-pared, que por mecánica de contacto no conformante, se desarrollan en la sub-superficie, aumentados por la fuerza de fricción entre el anillo y la pared. A todo esto, hay que agregarle los esfuerzos expansivos tridimensionales durante la explosión de la mezcla gasolina-aire y los esfuerzos térmicos que se generan a altas temperaturas. Esta es la razón por la cual aún se tienen que utilizar los liners de acero o de hierros duros. Los materiales de los liners tienen la característica de tener una alta dureza y una alta resistencia al desgaste a alta temperatura. Las aleaciones hipo-eutécticas de Al-Si, no tienen ni la dureza ni la resistencia al desgaste y parecería utópico pretender modificar la microestructura de estas aleaciones hasta llegar a los requerimientos actuales de resistencia al desgaste. De ahí surge la idea de utilizar las aleaciones híper-eutécticas, donde la estructura formada por cristales de Si pueden favorecer la resistencia al desgaste. La matriz eutéctica de α y Si, proporcionan un buen medio para la disipación del calor. La estructura de colada de las aleaciones híper-eutécticas muestra cristales de Si muy grandes. Un desarrollo fuera del alcance de este estudio es la modificación micro-estructural de esos cristales de Si. Lo anterior nos permitiría tener aleaciones con un buen comportamiento tribológico, y permitirá producir los monoblocks sin los liners y con un mejor rendimiento. Esto se ha logrado gracias a los nuevos desarrollos de las aleaciones híper-eutécticas mencionadas anteriormente. Sin embargo, la alta resistencia al desgaste también significa una mayor dificultad en su maquinado, debido a que los granos de Si se precipitan masivamente comportándose como partículas duras y abrasivas, ocasionando que la herramienta se desgaste con mayor facilidad. Afortunadamente ya existe un sólido conocimiento en la modificación micro-estructural de las aleaciones hipo-eutécticas, ver Figura 4.5 [6].

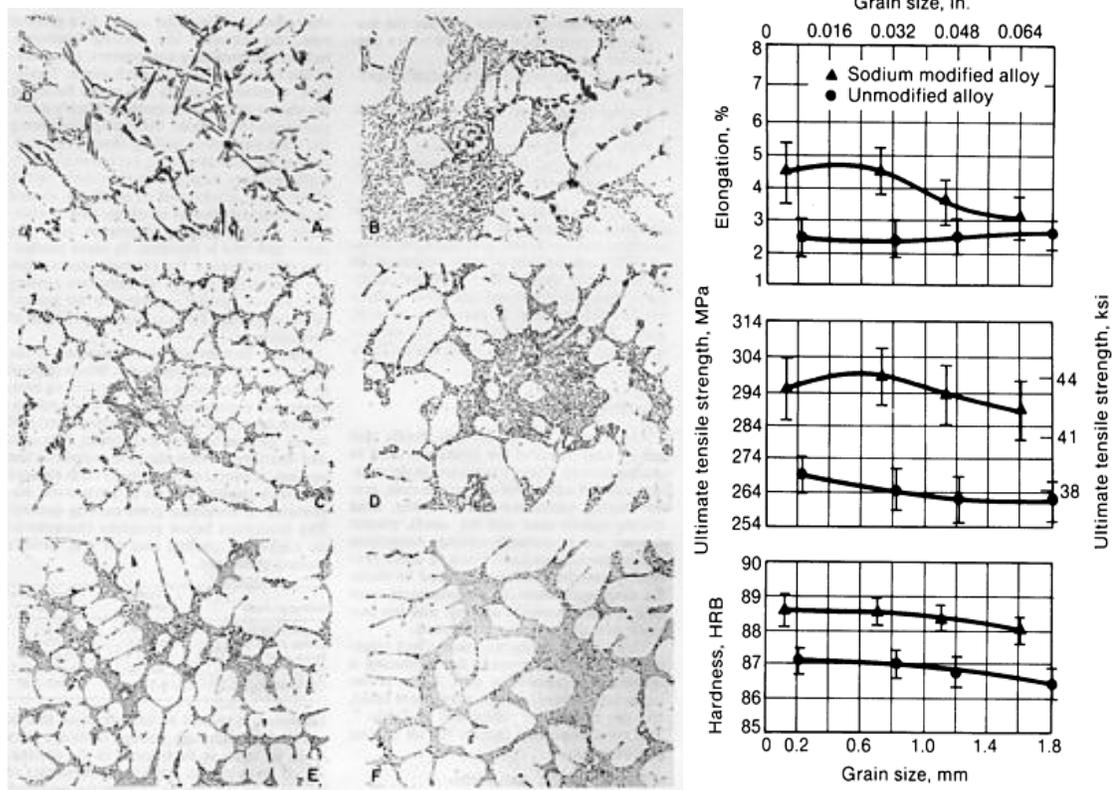


Figura 4.5. Varios niveles de modificación del eutéctico aluminio-silicio en aleaciones hipo-eutécticas; desde no modificado (A) hasta completamente modificado (F) [6].

Estas modificaciones permiten incrementar sus propiedades mecánicas. Utilizando similar cinética de modificación microestructural, se ha podido modificar la microestructura de las aleaciones híper-eutécticas a fin de incrementar su resistencia al desgaste. Nematik ya ha realizado varios desarrollos y ha comprobado la posibilidad de modificación de las estructuras [6,14] y ha demostrado el incremento en la resistencia al desgaste [5]. En la figura 4.6 se muestra un ejemplo de modificación microestructural en aleaciones híper-eutécticas [9].

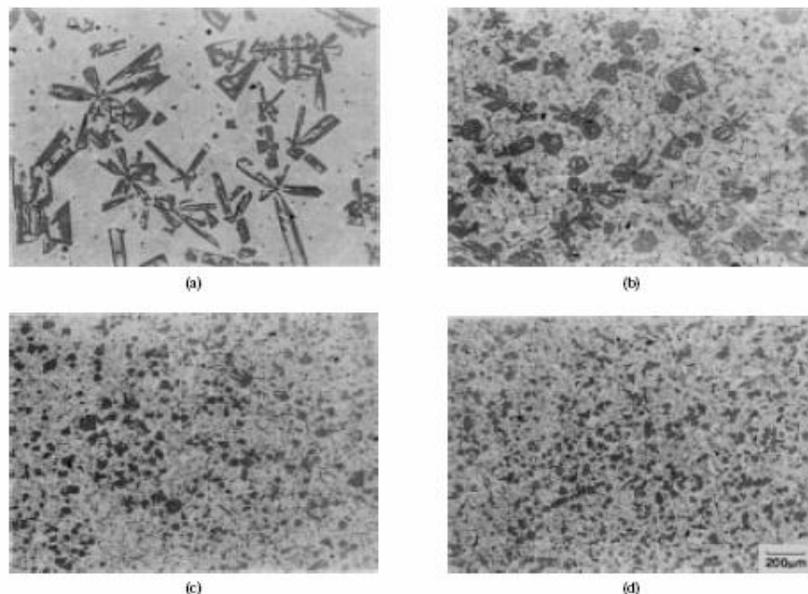


Figura 4.6. Cambio en el tamaño y forma de los cristales de Si primario con la adición de diferentes cantidades de TR (tierras raras) bajo las mismas condiciones de enfriamiento de 45°C/s: (a) 0% (b) 1% (c) 2% (d) 3% de TR [9].

En cuanto al maquinado, es importante mencionar que la interacción del filo de la herramienta con las diferentes fases de la microestructura de la aleación va a ser muy diferente cuando se tienen aleaciones hipo o hiper-eutécticas. El aumentar hasta cierto punto las cantidades de Silicio va a mejorar la fluidez o facilidad de moldeo, mejora la conductividad térmica, mejora notablemente la resistencia al desgaste y a la corrosión, incrementa las propiedades mecánicas, tiene una retención satisfactoria de propiedades mecánicas a altas temperaturas y dependiendo de la cantidad, se va a tener una maquinabilidad variable.

Para el desarrollo del dispositivo experimental de maquinado se diseñará una metodología de pruebas de maquinado que consistirá en un banco de pruebas instrumentado, en la cual se puedan variar los diferentes parámetros de maquinado, utilizando diferentes aleaciones con diferente nivel de modificación. De esta manera, poder determinar cuáles son los mejores parámetros de maquinado para cada tipo diferente de aleación.

Hay que tener en cuenta que el proceso de maquinado se ve afectado por las condiciones de corte en la herramienta. Estas van a determinar la remoción de material de la pieza a cortar, entre las mismas se encuentran: la composición química, las propiedades mecánicas y microestructurales, el tipo de material, todo esto tanto de la herramienta corte como de la pieza a trabajar, y por supuesto los parámetros de maquinado. Estos parámetros de maquinado, como ya se habían mencionado en el capítulo 3 del presente trabajo, quedan resumidos en la tabla 4.1 [10]:

- Velocidad de corte (V_c): Es la velocidad lineal con la cual los filos de corte de la herramienta se desplazan a lo largo de la pieza (m/min).
- Avance (V_f): Es desplazamiento rectilíneo relativo entre pieza y fresa.
- Profundidad pasada (a_p): Es la profundidad AXIAL de corte, se mide a lo largo del eje de giro de la fresa, y es la profundidad que penetra la fresa en la pieza al estar maquinando.

Tabla 4.1. Principales parámetros de maquinado [10].

Símbolo	Unidad	Nombre	Formulas
V_c	m/min	Velocidad de corte	$V_c = \frac{\pi \times \emptyset \times N}{1000}$
N	rev/min	Revoluciones por minuto	$N = \frac{1000 \times V_c}{\pi \times \emptyset}$
V_f	mm/min	Avance por minuto	$V_f = N \times Z \times F_z$
F_z	mm/diente	Avance por diente	$F_z = \frac{V_f}{N \times Z}$
D	mm	Diámetro de la herramienta	
Z		Numero de dientes	

En el proceso de corte se pueden alcanzar temperaturas de hasta 600°C en el punto de contacto del inserto con la pieza. Sin embargo el calor generado se distribuye en 80% en la rebaba y solo un 20% se queda en la herramienta y pieza de trabajo. Esto se puede ver en la Figura 4.7 de acuerdo al siguiente esquema [11].

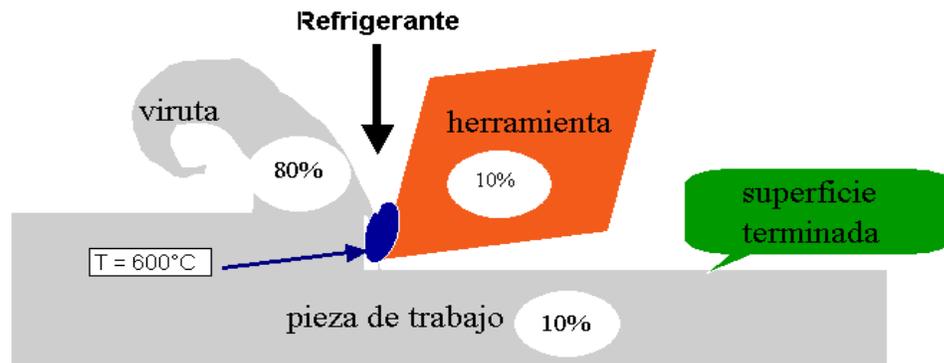


Figura 4.7. Representación esquemática del calor generado al maquinarse [11].

El incremento en temperatura es otro factor que debe ser tomado en cuenta al momento de evaluar la maquinabilidad de las aleaciones de Aluminio-Silicio. Algunos procesos de maquinado no se ven afectados por la falta de refrigerantes debido a que pueden ser procesos de maquinado en seco. Los procesos húmedos utilizan un sistema de refrigerante que alimenta un fluido de corte a las maquinas. Este fluido consiste generalmente de aceites semi-sintéticos ó sintéticos y agua siendo sus funciones principales la lubricación, enfriamiento y retiro de rebaba, otras funciones son que aumenta la vida de la herramienta, mejora las condiciones de corte, reduce el consumo de potencia, lava los insertos, ayuda a la protección anticorrosiva y mejora los acabados superficiales.

4.2 Componentes y funciones del dispositivo

El dispositivo experimental de maquinado está limitado a solo un proceso de maquinado, este proceso es el de fresado. El fresado es un proceso de fabricación con arranque de viruta, mediante el cual se maquina superficies en piezas de diversas formas y dimensiones [16]. Una fresa permite maquina superficies planas, ranuras, engranajes e incluso superficies curvas o alabeadas. El movimiento principal en el fresado es de rotación, tal como se representa gráficamente en la Figura 4.8 [12]. Dependiendo del tipo de máquina o la operación a realizar los movimientos de avance y de penetración son generalmente rectilíneos y pueden ser llevados en la herramienta de corte o la pieza de trabajo.

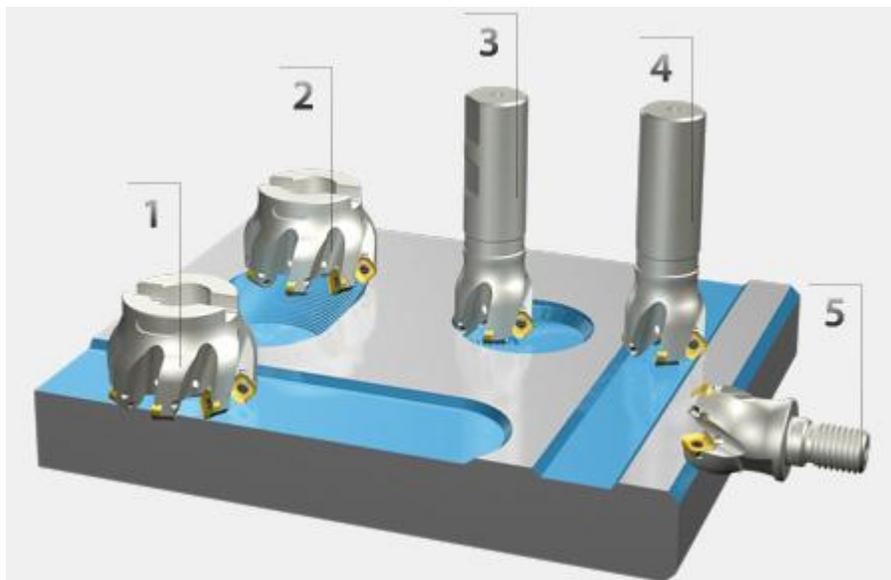


Figura 4.8. Representación esquemática del movimiento de las diferentes herramientas en el fresado [12].

La instrumentación del dispositivo experimental de maquinado de este proyecto consiste en habilitar una máquina fresadora sencilla con movimiento en los 3 ejes de su mesa. La mesa está situada donde se monta la pieza [17].

El husillo es donde se monta la herramienta y tiene movimiento rotacional y de desplazamiento en el eje z. El motor que hace girar al husillo debe producir el par necesario para realizar el corte, ver Figura 4.9.

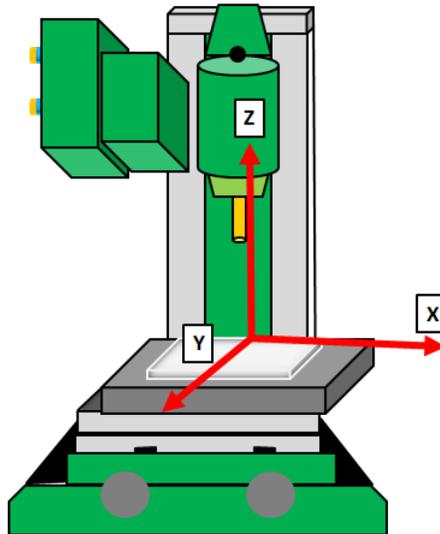


Figura 4.9. Representación esquemática de la máquina fresadora a ser instrumentada.

Se van a colocar dos celdas de carga en una base fija a la mesa de trabajo, direccionadas en los ejes "X" y "Y" para medir la fuerza que recibe la pieza al ser maquinada. Se colocará un amperímetro para medir el consumo de energía del motor al maquinar y con esto se puede traducir el par torsional en el husillo. Lo anterior es con el fin de evaluar la energía consumida, ver Figura 4.10.

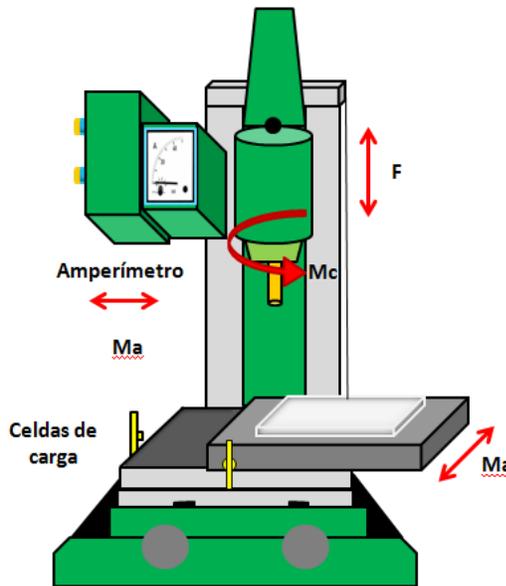


Figura 4.10. Representación esquemática de la máquina fresadora con la instrumentación propuesta.

Como el motor de accionamiento suministra la potencia requerida para el maquinado, esta potencia puede oscilar en un valor desde 1 kW en las máquinas más pequeñas hasta 10 kW o incluso valores superiores en máquinas de mayor tamaño. El motor de accionamiento en la parte cinemática de transmisión permite saber la potencia del cabezal de la máquina-herramienta donde se genera el movimiento principal de rotación.

Esta rotación se realiza alrededor del eje principal o husillo de la máquina, designado como eje Z. El eje X y Y son perpendiculares a Z, y forman el plano horizontal o mesa de trabajo y por lo tanto paralelo a la superficie de apoyo de la pieza, tal como se representa gráficamente en la Figura 4.11.

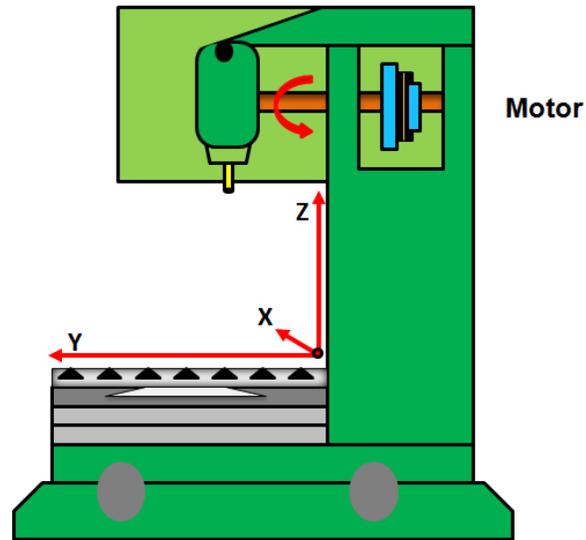


Figura 4.11. Representación esquemática de la maquina fresadora con la instrumentación propuesta, vista lateral.

4.3 Información a generar

Con la información recabada del amperímetro y las celdas de carga, se podrá conocer la potencia requerida para realizar el mismo maquinado con diferentes aleaciones. Posteriormente se analizarán por medio de observación ocular, y por medio de microscopía óptica y electrónica de barrido, los filos de las herramientas para discernir sobre los fenómenos de desgaste, tanto en forma cualitativa como cuantitativa. La información recabada del amperímetro y celdas de carga se convertirán tanto en la potencia utilizada como en los esfuerzos por unidad de área transversal maquinada. Posteriormente se convertirán en energía consumida por volumen maquinado.

Otra parte importante dentro del proceso de maquinado es amarrar las pieza a maquinar. Esto se lleva a cavo por medio del amarre de las bridas de apoyo a la mesa, por medio de tuercas y tornillos en T. La pieza va estar

apoyada en las tuercas y la brida regulable se amarra por medio del tensor en el cual se enrosca la tuerca que amarra firmemente la brida contra los diferentes puntos de la pieza. El tornillo de regulación sirve para regular en altura la brida para que amarre cualquier pieza y el amarre sea eficaz, ver Figura 4.12 [13].

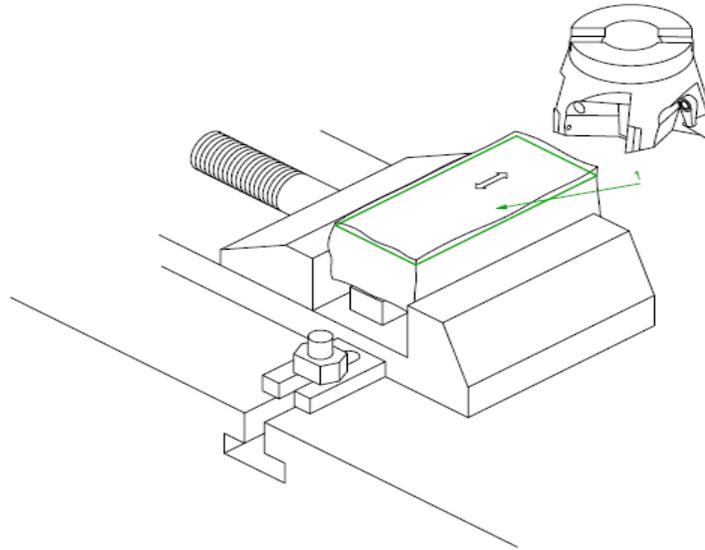


Figura 4.12. Representación esquemática de la sujeción de la pieza a ser fresada [13].

Basándose en un ejemplo real de maquinado, el dispositivo a desarrollar va a estar diseñado para que solamente trabaje un filo de la herramienta. Lo anterior para modificar los parámetros de prueba de tal manera que se puedan conseguir pruebas de vida acelerada de la herramienta. Este ejemplo se puede observar en la tabla 4.2 [10].

Tabla 4.2. Ejemplo de un proceso de fresado [10].

FRESADO							
EJEMPLO [9]					BANCO DE PRUEBAS		
Símbolo		Unidad	Pulgadas	Métrico	Símbolo	Pulgadas	Métrico
Diámetro	D	“ó mm	3.94”	100mm	D	3.94”	100mm
Velocidad de. Corte	Vc	m/mm	6184	1885	Vc	6184	1885
RPM	N		6000	6000	N	6000	6000
#Dientes	Z	#	12	12	Z	1	1
Avance/Diente	Fz	mm	.0056”	0.14 mm	Fz	0.0675	1.7145
Avance/Min.	Vf	mm/min	405”	10287 mm/min	Vf	405”	10287 mm/min
Con esto cambia Fz de 0.14 mm a 1.7145 mm							

Con lo anterior se espera determinar la vida de la herramienta por unidad de corte. También se busca conocer los parámetros para maquinado en función de la aleación, microestructura y dureza.

En el maquinado existen varios factores que nos van a permitir obtener resultados satisfactorios y que es importante tener en cuenta a la hora de seleccionar y establecer los parámetros de corte, ya que estos no van a ayudar a determinar otros factores. Estos factores han sido ampliamente referenciados en el capítulo 3 del presente trabajo y se resumen a continuación:

- El tipo de material. Esto permite determinar, la dureza, el tipo de viruta y como se comporta el material en el maquinado, etc.
- Las_herramientas a utilizar, estas siempre van a depender del tipo del material, operaciones a realizar, acabados superficiales, geometría, etc.

- La máquina, ya que afectan las dimensiones, robustez, potencia del cabezal, avances máximo, mínimo y de trabajo, etc.
- El refrigerante, éste tiene la capacidad de enfriar la parte activa de la herramienta y se encarga de la evacuación de la viruta.

De esta manera se podrán determinar cuáles son los parámetros de corte más adecuados para el maquinado de diferentes aleaciones y asimismo poder correlacionar en un futuro las propiedades mecánicas con los parámetros microestructurales de las aleaciones Al-Si híper-eutécticas de nuevo desarrollo.

4.4 Correlación con los parámetros microestructurales.

Una vez determinadas las condiciones de maquinado, se realizarán las correlaciones con las siguientes propiedades y parámetros microestructurales: Dureza, micro-dureza, porcentaje de fase de Si primario, o de otras fases que se formen durante la solidificación o modificación de las aleaciones. Tamaño promedio de partículas de Si primario o de otras fases presentes. Espaciado mínimo entre partículas de Si primario. Espaciado promedio entre partículas de Si. Espaciado promedio del brazo dendrítico secundario.

Con esta información, se podrá relacionar de manera sencilla una determinada aleación, conociendo su dureza, micro-dureza o algún parámetro microestructural, con los parámetros de maquinado encontrados y así proponer los códigos de maquinado óptimos, según el objetivo primario de proceso; a saber:

- mayor volumen de maquinado,
- mayor vida útil de herramientas
- menor distorsión de las piezas
- mejor acabado superficial
- menor tiempo de maquinado

Referencias

- [1] *The influence of sulfur on the machinability of gray cast iron FC25.* Pereira, Adriana Ana, Boehs, Lourival y Guesser, Wilson Luiz. 2006, *Journal of Material Processing Technology* 179, págs. 165-171.
- [2] *Comparative Machinability of Brasses, Steels and Aluminum Alloys.* Thiele, Eugene y al., et. *CDA Universal Machinability Index.*
- [3] Rao, Ventaka. *Machinability Evaluation of Work Materials. Decision Making in the Manufacturing Environment.* s.l. : Springer London, 2007, págs. 81-95.
- [4] NEMAK. *Patente 20100288461.*
- [5] F. Morales-Rendón. *Estudio sobre el desgaste de aleaciones hipereutécticas Al-Si. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León. En proceso, 2012.*
- [6] ASM International. *ASM Handbook. Vol. 2. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials.* ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1998.
- [7] *FIGURA CAST IRON LINERS*
- [8] *PROBLEMAS DE CAMISAS DE HIERRO*
- [9] J. Chang, I. Moon, C Choi. *Refinement of cast microstructure of hypereutectic Al-Si alloys through the addition of rare earth metals.* *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 33 (1998) 5015 – 5023.
- [10] *FORMULAS DE PARÁMETROS DE MAQUINADO TABLA 4.1.*
- [11] NEMAK. *Comunicación privada por parte del Departamento de Procesos de maquinado. Nemak, México. Enero 2012.*
- [12] *FIGURA DE FRESASO*
- [13] *FIGURA DE FRESADORA ()*
- [14] World Intellectual Property Organization. *US Patent WO 2008/053363 A2. 08 May 2008.*
- [15] F. Morales-Rendón. *Estudio de adhesividad entre una aleación de aluminio A319.0 y una camisa de aluminio base Al-Si-Cu-Mg para*

aplicaciones automotrices. Tesis M. C. Universidad Autónoma de Nuevo León. Junio 2003.

- [16] *ASM International. ASM Handbook. Vol. 16. Machining. ASM Inter. The Materials Information Society. Ohio Park, USA. 1997.*