MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DETERMINACIÓN DEL FENÓMENO DE LA ACRITUD EN VIRUTAS DEFORMADAS DURANTE EL PROCESO DE TORNEADO

Tesis en opción al título de ingeniero mecánico

Autor: Adrián Durán Oliveros

Tutora: Ms. C. Dayanis Alcántara Borges

Moa - 2017

Declaración de autoridad:

Yo: Adrian Durán Oliveros

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

_____
Adrian Durán Oliveros

_____
Ms. C. Dayanis Alcántara Borges

Agradecimientos:

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el transcuso de mi carrera.

A mi tutora Ms. C. Dayanis Alcántara Borges, por su precioso tiempo, conocimiento y dedicación sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

Al compañero Dr. C. Tomás Hernaldo Fernández Columbié, consultante dedicado y dispuesto a soportarme en todo momento.

A mis familiares por su constante preocupación y por haberme apoyado en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis compañeros de estudios, por la ayuda mostrada en la realización de este trabajo.

A mis amigos más cercanos, por el empuje y la constancia mostrada durante todo este período de estudio.

A la Revolución y especialmente a Fidel por darme la oportunidad de superarme.

A todos

Muchas Gracias.

Dedicatoria:

Quiero dedicar este trabajo a mi madre Liliana Oliveros Oliveros y a mi tía Marlen Oliveros Oliveros por haber sido las principales promotoras de mi superación.

A mi hermano Álvaro Luis Gómez Oliveros con la esperanza de que este éxito sea motivo de inspiración para su futura formación profesional.

A mi novia por su incondicional apoyo y consentimiento.

A Tomás por su incondicional apoyo y a su familia por soportarnos.

A todos aquellos que de una forma u otra estuvieron siempre y se preocuparon por mis estudios.

A nuestra Revolución, por las posibilidades que nos ofrece.

Pensamiento

"La gran victoria que hoy parece fácil, es el resultado de pequeñas victorias que pasaron de ser percibidas."

Paulo Coelho.

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo establecer el efecto de la acritud en diferentes tipos de virutas obtenidas durante el corte ortogonal del acero AISI 1045 con cuchilla de carburo metálico del tipo T 15 K 6. Se sometió a proceso de arranque de virutas una barra del acero con números de revoluciones de 54, 75, 110 y 300 rev/min; profundidad de corte de 7 y 5 milímetros y avances de 0,25; 0,43; 0,25 y 0,35 mm/rev. Durante el proceso de mecanizado fueron obtenidas virutas del tipo discontinua, en espiral, fragmentadas y continuas, las cuales al realizar el análisis microestructural se determinó que las mismas luego del corte mantienen una estructura bifásica de ferrita – perlita, donde los granos se hacen más finos, desde el número 5para la muestra patrón, hasta el número 10, para número de revoluciones de 54 rev/min, profundidad de corte de 7 milímetros y avance de 0,25 mm/rev, siendo del número de granos del número 7 para 300 rev/min; 5 mm de profundidad y avance de 0,35 mm/rev, lo que demuestra que esta disminución es por el efecto de la acritud. Durante el análisis de microdureza en las muestras analizadas se estableció que, al emplear un número de revoluciones de 54 rev/min, existe un valor de dureza de 260 HV y para 300 rev/min, la dureza es de 228 HV, incremento asociado al efecto combinado de la fricción, la cual genera la acritud. Finalmente se establece la valoración económica, así como las incidencias medio ambientales.

ABSTRACT

The aim of this work is to establish the effect of the acrimony on different types of chips obtained during the orthogonal cut of the AISI 1045 steel with a metal carbide blade type T 15 K 6. A steel bar with revolutions of 54, 75, 110 and 300 rev/min; depth of cut of 7 and 5 millimeters and advances of 0.25, 0.43, 0.25 and 0.35 mm/rev. During the machining process, discontinuous, spiral, fragmented and continuous chips were obtained, which, when performing the microstructural analysis, were determined after the cutting to maintain a biphasic structure of ferrite - perlite, where grains become thin, since The number 5 for the standard sample, up to number 10, for revolutions of 54 rev/min, depth of cut of 7 millimeters and advance of 0.25 mm/rev, being the number of grains from number 9 to 300 rev/min; 5 mm of depth and advance of 0.35 mm/rev, which shows that this decrease is due to the effect of acrimony. During the analysis of microhardness in the analyzed samples it was established that, when using a number of revolutions of 54 rev/min, there is a hardness value of 260 HV and for 300 rev/min, the hardness is 228 HV, increase associated with combined effect of friction, which generates acrimony. Finally, the economic valuation was established, as well as the environmental impacts.

ÍNDICE Pág

INTRODUCCIÓN. 1

CAPITULO I. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.

1.1. Introducción. 4

1.2. Procesos de mecanizado. 4

1.2.1. Proceso de mecanizado en seco. 6

1.2.2. Clasificación de los diferentes tipos de mecanizado. 8

1.3. Campos de temperatura de la viruta y la herramienta. 11

1.3.1. Fenómeno de adhesión en la interfase. 12

1.3.2. Teoría de formación de virutas en metales. 13

1.3.3. Importancia del análisis de las virutas producidas por los procesos de mecanizado. 15

1.3.4. Preparación de las raíces de viruta. 18

1.4. Proceso de mecanizado en corte ortogonal. 20

1.5. Conclusiones del capítulo 1. 22

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción. 23

2.2. Composición química del acero AISI 1045. 23

2.3. Modelo del corte ortogonal para la obtención de las virutas. 24

2.3.1. Planificación experimental para la obtención de las virutas. 25

2.3.2. Número de revoluciones por minutos del husillo. 25

2.3.3. Avance de la herramienta. 26

2.3.4. Profundidad de corte. 26

2.3.5. Dureza superficial. 26

2.3.6. Comportamiento microestructural. 27

2.4. Microestructura del acero AISI 1045. 27

2.5. Preparación metalográfica. 28

2.5.1. Área para la selección de las muestras. 28

2.5.2. Selección de las muestras. 30

2.5.3. Encapsulado de las muestras en resina epoxi ROYAPOX – 5050. . . 31

2.5.4. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050. 32

2.5.5. Desbaste y pulido. 32

2.5.6. Lijado grueso y fino. 32
2.5.7. Ataque de las muestras para su examen microscópico. . . . 33
2.6. Equipos empleados en la experimentación. 33
2.6.1. Pulidora metalográfica Montasupal. 33
2.6.2. Microscopio óptico. 34
2.6.3. Determinación de la microdureza. 34
2.6.4. Características del torno C 11 MT. 35
2.7. Cálculo de los regímenes de corte para el torneado. 37
2.7.1. Cálculo de la velocidad de corte. 37
2.7.2. Operación de refrentado. 37
2.7.3. Tiempo de maquinado de las probetas. 38
2.8. Conclusiones del capítulo 2. 40
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS
3.1. Introducción. 41
3.2. Análisis de los regímenes de elaboración. 41
3.3. Análisis de la microdureza. 43
3.4. Análisis del comportamiento microestructural de las virutas. . . . 43
3.4.1. Análisis microestructural para 54 rev/min, t = 7 mm y S = 0,25 mm/rev. . 44
3.4.2. Análisis microestructural para 75 rev/min, t = 7 mm y S = 0,43 mm/rev. . 45
3.4.3. Análisis microestructural para 110 rev/min, t = 5 mm y S = 0,25 mm/rev. . 47
3.4.4. Análisis microestructural para 300 rev/min, t = 5 mm y S = 0,35 mm/rev. . 49
3.5. Análisis del tiempo de vida útil de la herramienta. 51
3.6. Valoración económica. 52
3.7. Valoración del impacto medio ambiental. 53
3.8. Conclusiones del capítulo 3. 54
CONCLUSIONES GENERALES
RECOMENDACIONES
BIBLIOGRAFÍAS

INTRODUCCIÓN

La fabricación de piezas mediante mecanizado es una decisiva rama de la industria mecánica que da una cierta medida del desarrollo económico alcanzado por un país. Cuando se habla de fabricación de piezas, generalmente se piensa inmediatamente en las máquinas herramienta, se analiza si son modernas o anticuadas y se valora la productividad de estas. Se destaca la necesidad de concebir secuencias tecnológicas racionales, diseñar y construir dispositivos que aumenten la productividad y la precisión, y se cuestiona con poco éxito hasta ahora, la disciplina tecnológica de los operarios. Pero pocas veces se piensa en las herramientas de corte como un elemento decisivo en este proceso, que influye más de lo estimado en la rentabilidad. Más bien hay tendencias conservadoras que ofrecen resistencia a la adquisición de herramientas de corte modernas, enarbolando como argumento fundamental el cada vez más alto costo de ellas.

El objetivo fundamental en los Procesos de Manufactura por Arranque de Viruta es obtener piezas de configuración geométrica requerida y acabado deseado. La operación consiste en arrancar de la pieza bruta el excedente (mal sobrante) del metal por medio de herramientas de corte y maquinas adecuadas.

Entre las máquinas herramienta más utilizadas está el torno, en esta máquina el movimiento de corte, arranque de la viruta, es circular y generalmente lo realiza la pieza que gira alrededor de su propio eje, eje de giro, moviéndose contra el filo de la herramienta; mientras el movimiento de penetración consiste en situar la cuchilla a la profundidad de corte necesaria. El movimiento de avance realizado por el movimiento de penetración de la herramienta combinado con el de corte hace posible el arranque de la viruta de manera continua.

En la práctica el mecanizado de alta velocidad consiste básicamente en sustituir pocas pasadas lentas de gran profundidad de corte por muchas pasadas rápidas de menor profundidad de corte, obteniéndose un importante incremento en la cantidad de material desplazado. El incremento de la velocidad de giro del cabezal debe de ir acompañado de un incremento de la velocidad de avance de los ejes. La capacidad de aumentar de forma notable la velocidad de arranque de viruta conlleva a la clara ventaja de disminuir el tiempo de mecanizado.

El cambio del tipo de material de la herramienta (o él de la pieza) así como de algunas condiciones de corte (la velocidad de corte, la profundidad de corte, el ángulo de

desprendimiento), los mecanismos de generación de las virutas, que pueden cambiar de ser continua a serrada o segmentada (rotura del material). Por otra parte, cerca del filo de la herramienta se producen zonas de carga extrema con elevados valores de deformación, de velocidad de deformación y de temperatura y generación de nuevas superficies libres (superficie mecanizada).

Fabricar objetos mediante el arranque de material es una tecnología que aparece ya en las actividades de manufactura en las primeras civilizaciones conocidas hace miles de años. A pesar de esto, la modelización de este proceso de mecanizado sigue siendo un desafío para los investigadores debido a la continua necesidad industrial de mejorar el proceso o de mecanizar nuevos tipos de materiales como las aleaciones de baja maquinabilidad o los materiales compuestos.

Situación problémica

La distribución de las tensiones en la interfase viruta - herramienta es uno de los problemas inevitables en el mecanizado y es consecuente con el estado real del contacto mecánico en esa zona. La existencia simultanea de una zona de adhesión y una zona de deslizamiento, pone en evidencia el carácter discontinuo y complejo del contacto en la interfase. Estas condiciones inducen el desgaste de la herramienta que, a su vez, afecta de forma negativa la vida útil de la misma, la calidad de la superficie mecanizada y su exactitud dimensional y en consecuencia, a la economía de las operaciones de corte.

El **problema** lo constituye: las teorías existentes no fundamentan el comportamiento de la acritud en la interfase viruta - herramienta en el mecanizado de pieza al ser sometidas a corte ortogonal.

Como posible solución al problema se establece la siguiente **hipótesis:**

Para diferentes regímenes de elaboración donde se consideran: profundidad de corte, número de revoluciones y avance en piezas sometidas a corte ortogonal se podrá determinar el efecto del fenómeno de la acritud en diferentes virutas obtenidas por corte ortogonal y predecir la vida útil del filo cortante de la herramienta.

El presente trabajo se establece como **objetivo general:** determinar el efecto del fenómeno de la acritud con diferentes regímenes de corte en un acero AISI 1045 sometido al proceso de maquinado por corte ortogonal.

Como **objeto de estudio**

Acero AISI 1045 sometido a proceso de maquinado por corte ortogonal.

El **campo de acción**.

Fenómeno de la acritud en virutas obtenidas del proceso de maquinado por corte ortogonal en el acero AISI 1045.

Objetivos específicos

1. Establecer los procedimientos relacionados con los procesos de mecanizados en la formación de virutas en correspondencia con las tensiones en la interfase viruta - herramienta, así como el efecto de la fricción durante el corte ortogonal de acero de medio contenido de carbono.
2. Establecer el procedimiento metodológico para la caracterización del fenómeno de la acritud en diferentes tipos de virutas obtenidas del corte ortogonal en el acero AISI 1045, en correspondencia con los regímenes de corte establecidos.
3. Fundamentar a través del análisis microestructural y la dureza, el efecto del fenómeno de la acritud en diferentes virutas obtenidas por corte ortogonal en el acero AISI 1045.

Para dar cumplimiento a este objetivo han sido trazadas las **tareas** siguientes:

1. Establecimiento del estado del arte relacionado con el objeto de estudio.
2. Planificación, diseño y realización de experimentos.
3. Establecimiento del proceso de maquinado del acero AISI 1045 a partir de los diferentes regímenes de corte para la obtención de los diferentes tipos de virutas.
4. Fundamentación de las variaciones del tamaño de granos que origina el fenómeno de la acritud durante el proceso de corte ortogonal en el acero AISI 1045.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales del proceso de maquinado con arranque de virutas.

Capítulo 1

Marco teórico. Antecedentes investigativos

1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Introducción

El mecanizado es un proceso mecánico que consiste en la fabricación de piezas de gran precisión. El método se basa en el arranque de material de un bloque inicial de materia prima, mediante una herramienta, hasta la obtención de la geometría de la pieza final. Fabricar objetos mediante el arranque de material es una tecnología que aparece ya en las actividades de manufactura en las primeras civilizaciones conocidas hace miles de años. A pesar de esto, la modelización de este proceso de mecanizado sigue siendo un desafío para los investigadores debido a la continua necesidad industrial de mejorar el proceso o de mecanizar nuevos tipos de materiales como las aleaciones de baja maquinabilidad o los materiales compuestos.

En el presente capítulo se establece como objetivo la búsqueda bibliográfica relacionada con el proceso de obtención de virutas que se generan en el proceso de mecanizado durante el corte ortogonal.

1.2. Procesos de mecanizado

Se entiende por mecanizado al conjunto de operaciones por las que se obtiene una pieza de forma y dimensiones deseadas, partiendo de una pieza en bruto (tocho), eliminando o arrancando parte del material que la compone (arranque de viruta). Por lo tanto, en este tipo de proceso, por definición, no se produce aporte de material, ni se le da forma por doblado, ni estiramiento.

El mecanizado en la actualidad se concentra en la formación de viruta, aunque su principal objetivo sea el corte del metal para la obtención de una forma y tamaño deseada. El mecanizado moderno produce una gran cantidad de viruta y controlar su formación, quiebre y remoción es un requisito necesario (Sandvik Coromant, 1994).

El proceso de mecanizado ha sido estudiado científicamente hace décadas. Para poder realizar una descripción de este proceso se han desarrollado descripciones teóricas y empíricas, así como modelos descriptivos. El proceso es realizado en un entorno que requiere extraordinarias mediciones para su estudio, pero se puede concluir que es una combinación de material de la pieza de trabajo y de la herramienta, los parámetros de corte y las temperaturas y fuerzas (Metals handbook ASM, 1978).

La configuración más sencilla del mecanizado es el corte ortogonal donde el ángulo de corte $\lambda = 0$, como se muestra en la figura 1.1. En este caso particular, la velocidad de corte es perpendicular al filo de corte. Además, considerando que el ancho de corte es muy superior al avance, es razonable considerar el problema bajo la hipótesis de deformación plana.

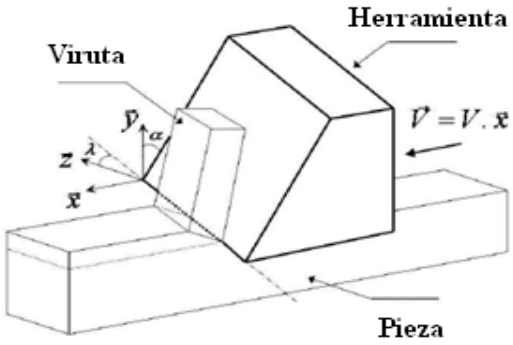


Figura 1.1: Esquema del modelo de corte general (corte oblicuo).

Para la comprensión del proceso de mecanizado es necesario conocer el comportamiento de los diferentes tipos de metales cuando se forma la viruta, de aquí nace la necesidad de predecir la temperatura y las fuerzas de corte que se generan, ya que su papel es fundamental en la calidad del proceso. Con este conocimiento, se pueden diseñar herramientas que permitan controlar dichos parámetros y condicionar el mecanizado (Sandvik Coromant, 1994).

Los procesos de fabricación mediante arranque de material requieren elevadas cantidades de energía y consumen una gran cantidad de recursos, fundamentalmente agua y minerales. Adicionalmente, el empleo de fluidos de corte, peligrosos para el medio ambiente, para mejorar los mecanismos de corte por medio de la lubricación y refrigeración del conjunto herramienta - pieza, sitúa a los procesos de mecanizado por arranque de material dentro del grupo de procesos que deben avanzar en el camino de la sostenibilidad.

La eficacia del fluido de corte está condicionada por diversas cuestiones como: tipo de operación de mecanizado, material de trabajo y condiciones operativas (De Chiffre y Belluco, 2000). La influencia que ejerce el fluido de corte en la temperatura alcanzada en el material resulta evidente, identificándose una reducción de la temperatura al incrementar el caudal de fluido empleado (Zhong *et al.*, 2010a).

Como primer acercamiento al mecanizado, hemos de citar los trabajos por ejemplo de Miguélez *et al.* (2006) ó de Bäker (2006) donde se consideró una fricción nula en la interfase. Esta hipótesis se hizo para simplificar el análisis de los resultados obtenidos relacionados particularmente con la zona primaria de deformación (por ejemplo la variación del ángulo ϕ). Los autores argumentaban que el dominio de validez de sus estudios cubre únicamente las altas velocidades de corte. Para justificarlo, Bäker (2004) se apoyó en las observaciones experimentales de Hoffmeister y de Gente, que enseñan que a grandes velocidades de corte, el coeficiente de fricción aparente baja de forma significativa.

En 1995 Shi *et al.* (1995), publicaron un trabajo donde presentaron un modelo termomecánico de corte ortogonal bajo la formulación lagrangiana, con una herramienta de punta perfecta e implementaron un criterio de separación de material para conseguir la formación de la viruta. Los autores variaron el ángulo de desprendimiento (entre 15 y 30º) y el coeficiente de fricción implementado (entre 0 y 0,6) para una velocidad de corte de 2,54 m/s y un avance de 0,254 mm/rev.

1.2.1. Proceso de mecanizado en seco

El mecanizado en seco es el objetivo final para lograr procesos de mecanizado respetuosos con el medio ambiente, constituyendo una alternativa adecuada frente al mecanizado mediante fluidos de corte siempre que se consigan alcanzar los mismos tiempos de operación, vida de la herramienta y calidad de las piezas. El desarrollo tecnológico en el campo del mecanizado, visible en cuestiones como la constante evolución de las herramientas de corte (geometría y recubrimientos) y mejoras en los materiales de trabajo, permite avanzar en la eliminación de la refrigeración mediante fluidos de corte (Klocke y Eisenblätter, 1997).

De especial interés resultan los avances producidos en el campo de los recubrimientos. La misión de los recubrimientos consiste en suplir las funciones que desempeñan los fluidos de corte. En particular, en lo referente a aquellas que permiten alargar la vida de la herramienta. En relación con el uso de recubrimientos, durante el mecanizado en seco de una aleación de níquel - cromo, el fuerte desgaste de las herramientas de carburo cementado hace recomendable la utilización de recubrimientos para su mecanizado,

siendo el nitruro de aluminio - titanio (TiAlN) el que muestra un mejor comportamiento (Devillez *et al.*, 2007).

A pesar de los avances producidos en las últimas décadas, el mecanizado en seco todavía no resulta una técnica adecuada para todos los tipos de procesos necesarios en la industria hoy en día (Kelly y Cotterell, 2002). En este sentido, Weinert *et al.* (2004) estudian la adecuación del mecanizado en seco y sistema de refrigeración de mínima cantidad de lubricante o MQL (*Minimum Quantity Lubrication*) para distintos tipos de procesos y materiales, no siendo recomendable el mecanizado en seco en todos los casos analizados.

En el mismo sentido, Filipovic y Stephenson (2006) indican que el taladrado en seco puede generar una distorsión térmica excesiva y una pobre vida de las herramientas. Asi mismo, el mecanizado en seco no resulta ser una técnica adecuada en el taladrado de aleaciones de aluminio - silicio, debido a la ductilidad de la pieza que hace que las virutas se peguen a la herramienta en un breve periodo de corte (Dhar *et al*., 2006).

La herramienta de corte juega un papel relevante en el mecanizado en seco, debiendo adaptarse al sustrato empleado, y poseer una geometría y recubrimiento adecuado al trabajo a realizar. La ausencia de fluidos de corte en el mecanizado tiene como principales inconvenientes la generación de calor, la aparición de mecanismos de adhesión, la fricción en el conjunto herramienta - pieza y una mayor dificultad en el proceso de evacuación de las virutas. No obstante, el mecanizado en seco ofrece algunas ventajas como la ausencia de choques térmicos (Klocke y Eisenblätter, 1997).

La aplicación del mecanizado en seco requiere el conocimiento de la influencia de los parámetros de corte y sus interrelaciones, así como los límites de aplicación de la técnica. Uno de los factores de relevancia en el proceso es la velocidad de corte. Así, se conoce experimentalmente que aumentos en la velocidad de corte ocasionan incrementos en la temperatura en la zona de trabajo. El desgaste del flanco también se encuentra relacionado con la velocidad de corte, produciéndose a bajas velocidades de corte desgaste por abrasión, y a altas velocidades de corte desgaste por adhesión (Klocke y Eisenblätter, 1997).

En relación con la vida de la herramienta, la literatura especializada recoge diversa experimentación que desaconseja el mecanizado en seco debido al excesivo desgaste

generado en la herramienta en comparación con otros sistemas, como la refrigeración/lubricación convencional y el sistema MQL (Diniz y Micaroni, 2002 y Diniz y Oliveira, 2004).

Así, ensayos realizados mediante mecanizado en seco, sobre acero, ofrecen tasas de eliminación de viruta inferiores a las obtenidas en ensayos similares realizados empleando aceite sintético con un 6 % de concentración de agua, para distintas velocidades de corte y avances. No obstante, a medida que se incrementa el avance de la herramienta o, simplemente, avance, se reducen las diferencias entre ambos sistemas. Asimismo, la rugosidad superficial obtenida en el mecanizado en seco mejora la obtenida mediante refrigeración/lubricación convencional (Diniz y Micaroni, 2002).

Por otra parte, otros ensayos realizados utilizando mecanizado en seco, sobre acero, una herramienta de nitruro de boro cúbico policristalino o PCBN (del inglés *Polycristalline Cubic Boron Nitride*) y una velocidad de corte de 110 m/min, muestran un menor desgaste del flanco de la herramienta que el obtenido con refrigeración/lubricación convencional, sistema de refrigeración MQL y refrigeración gaseosa mediante aire comprimido.

Ensayando mecanizado en seco, refrigeración/lubricación convencional y sistema MQL para diferentes velocidades de corte se obtienen resultados aproximados entre mecanizado en seco y sistema MQL, en términos de desgaste del flanco de la herramienta, obteniéndose en el caso del mecanizado mediante refrigeración/lubricación convencional desgastes del flanco de la herramienta superiores. De manera similar, los resultados de rugosidad superficial permiten identificar, en términos generales, un peor comportamiento de la refrigeración/lubricación convencional en comparación con el mecanizado en seco y el sistema MQL (Diniz *et al.*, 2003).

1.2.2. Clasificación de los diferentes tipos de mecanizado

Tradicionalmente, el mecanizado se ha evaluado empleando procesos de mecanizado continuos, en particular, torneado continuo según la norma ISO 3685:1993 (ISO 3685, 1993). No obstante, este tipo de estudios son poco representativos de los procesos de mecanizado modernos, en los que resulta habitual realizar operaciones que se componen de ciclos en los que se suceden periodos de mecanizado y periodos sin operaciones de mecanizado (Chandrasekaran y Thoors, 1994).

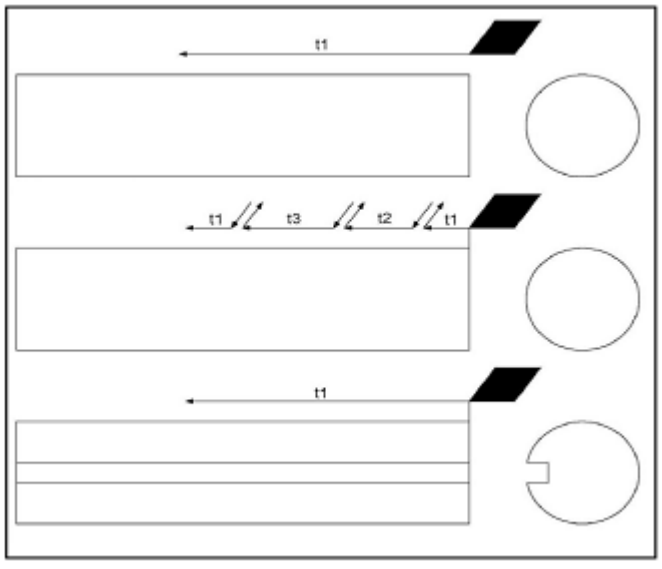
Además, debe considerarse que las piezas a mecanizar pueden presentar discontinuidades en sus superficies, como agujeros, canales de lubricación, molduras y ranuras, antes del torneado final (Diniz *et al.*, 2005 y Oliveira *et al.*, 2009).

Las diferencias existentes entre el mecanizado continuo y discontinuo hacen que los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas mediante mecanizado continuo no puedan ser transferidos directamente al mecanizado interrumpido (Tönshoff *et al*, 1990).

Entre los procesos de mecanizado es posible establecer una clara distinción entre aquellos en los que la herramienta de corte mecaniza la superficie de la pieza sin ninguna interrupción y aquellos en los que el corte no es continuo, distinguiéndose corte continuo y discontinuo, respectivamente.

Adicionalmente, es posible identificar dos tipos de mecanizado discontinuo: interrumpido e intermitente. En el mecanizado interrumpido existen periodos de tiempo en los que la herramienta no corta el material. Estas interrupciones dependen del producto o de la serie de productos a fabricar. En el mecanizado intermitente, existe al menos una interrupción o ranura en cada vuelta, por lo que en cada vuelta se produce una interrupción en el mecanizado. Así, en el mecanizado intermitente la herramienta se expone en cada vuelta a choques mecánicos debido a los movimientos de entrada y salida de la herramienta de la pieza (Beswick, 2002).

La figura 1.2 muestra los tres tipos de mecanizado identificados, pudiendo apreciarse la geometría de las piezas y los movimientos que efectúa la herramienta:



Mecanizado continuo

Mecanizado interrumpido

Mecanizado intermitente

Figura 1.2. Tipos de mecanizado. Fuente: Beswick, 2002.

Uno de los temas de mayor interés en el análisis del mecanizado discontinuo es la evaluación de la calidad superficial obtenida. La evolución de la rugosidad superficial presenta diferencias según el tipo de corte realizado, así en el mecanizado continuo la rugosidad aumenta a medida que aumenta el desgaste de la herramienta, mientras que para el mecanizado interrumpido sucede lo contrario (Pavel *et al.*, 2005).

Las especiales características del mecanizado discontinuo: constante golpeo de la herramienta con el material, en el mecanizado intermitente, y cambios de temperatura debido a la existencia de periodos de operación alternados con periodos en los que no se realizan operaciones, en ambos procesos, hacen más probable la ocurrencia de fallos catastróficos en la herramienta que fallos debidos al desgaste (aunque puedan presentarse ambos). Así, las investigaciones sobre mecanizado discontinuo se centran en el estudio del fallo catastrófico, siendo las principales líneas de investigación los materiales a emplear en las herramientas y los mecanismos de fallo que se producen durante el mecanizado discontinuo.

La búsqueda de modelos matemáticos con los que predecir la temperatura alcanzada en la zona de corte ha sido afrontada por diversos investigadores. Así, por ejemplo, Lazoglu y Altintas (2002) plantean un modelo para predecir la temperatura en la zona de corte en el mecanizado continuo e interrumpido. Mediante el modelo matemático se pueden elegir los parámetros de mecanizado adecuados para evitar alcanzar temperaturas próximas a las temperaturas de difusión y acoplamiento de los materiales empleados en la herramienta. En el mecanizado interrumpido las temperaturas son cíclicas, incrementándose durante el mecanizado y disminuyendo durante los tiempos en los que no se realizan operaciones (Da Silva y Wallbank, 1999).

Según Armendia *et al*. (2010) y Kountanya (2008) en el corte interrumpido, debido a los periodos de refrigeración que se producen cuando no se mecaniza la pieza, las temperaturas alcanzadas durante el mecanizado interrumpido son menores que las alcanzadas durante el mecanizado continuo. Asimismo, se observa cómo a medida que se incrementan los periodos de refrigeración, las temperaturas máximas alcanzadas en el mecanizado disminuyen, aunque se generan ciclos térmicos de hasta 250 ºC de amplitud (Armendia *et al.*, 2010).

1.3. Campos de temperatura de la viruta y la herramienta

Tanto en la viruta como en la herramienta el calor no es distribuido uniformemente. En las capas de la viruta más cercanas a la herramienta, la temperatura será mayor que en las más lejanas. Esto ocurre, debido a una deformación no uniforme a lo largo del espesor de la viruta no cortada durante la compresión de la capa en frente de la herramienta y a la deformación adicional de una capa de la viruta por las fuerzas de fricción que ocurren cuando la viruta se desliza a lo largo de la capa arrastrada y la cara de la herramienta (Arshinov y Alekseev, 1970).

Por lo tanto, se concluye que la temperatura de la pieza de trabajo decrece a medida que se aleje de la superficie de corte. La mayor temperatura se observa en el punto de contacto entre la herramienta y el material de trabajo. La temperatura más alta de la herramienta se debe hallar en las capas limites de las áreas de contacto con la viruta y con el material de trabajo. La temperatura de las capas inferiores y lugares más alejados de los puntos de contacto depende de la conducción de calor.

De toda la zona de contacto de la viruta con la cara de la herramienta la temperatura más alta alcanzada por la herramienta y la viruta se encontrará en el centro de presión de la viruta en la herramienta. El flanco de la herramienta es calentado en mayor parte debido al trabajo realizado para superar la fricción; para materiales plásticos, este trabajo es menor que el trabajo realizado en la cara de a herramienta. La cara de la herramienta recibe calor tanto de la viruta altamente calentada como del considerable trabajo realizado debido a la fricción de la viruta en la cara. Por consiguiente, la cara de la herramienta es calentada a una temperatura mayor que la del flanco (Groover, 2010).

Childs (2006) publicó en 2006 un artículo sobre la validez de la implementación del modelo de fricción de Coulomb entre la herramienta y la viruta. El autor realizó en AdvantEdge un modelo termomecánico de corte ortogonal de un acero de baja contenido en carbono con un avance de 0,1 mm y una velocidad de corte que varía entre V = 50 m/min y V = 250 m/min. Childs implementó dos valores de coeficiente de fricción (m = 0,4 y m = 1) en el modelo dado por la relación (1 - 4). En su estudio, Childs propone limitar la tensión de fricción, no al límite en cizallamiento del material, sino a una fracción.

1.3.1. Fenómeno de adhesión en la interfase

La distribución a lo largo de la interfase de la velocidad relativa de deslizamiento viruta/herramienta está representada en la figura 1.2 para los diferentes niveles de fricción implementados. Los resultados muestran la existencia de una zona de material adherido ("sticking") para los coeficientes de fricción m = 0,6; m = 0,8 y m = 1,0.

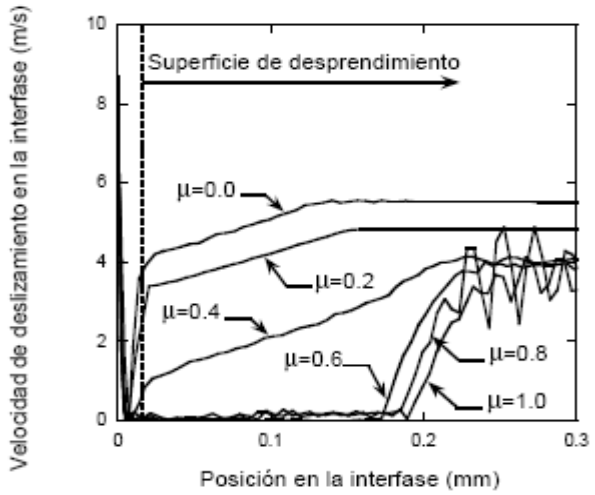


Figura 1.2: Velocidad de deslizamiento del material a lo largo de la interfase para una velocidad de corte V = 8m/s y diferentes valores de coeficiente de fricción.

La zona de adherencia se caracteriza por una velocidad de deslizamiento relativo nulo o cuasi nula. Se puede observar como la longitud de la parte pegada aumenta ligeramente con el aumento del valor de fricción implementado. La velocidad de deslizamiento de la viruta sobre la herramienta no es homogénea a lo largo de la interfase: solo para los coeficientes de fricción bajos ($m \leq 0,4$), la velocidad del material no es totalmente nula en la zona definida por el redondeo de la punta de la herramienta ($0 \leq x \leq 15$ mm). Por tanto, en la superficie de desprendimiento, el material siempre sufre un aumento progresivo de la velocidad antes de llegar al valor estabilizado de salida de viruta y eso incluso para los casos donde se obtuvo contacto adherido.

El modelo de Zorev (1963) representa de manera simple estas dos situaciones. Este modelo está gobernado por la ley de fricción de Coulomb donde la tensión de fricción τ es proporcional a la tensión normal σ mediante un coeficiente de fricción μ constante. La tensión normal aumenta cuando la posición se aproxima al filo de corte y la relación de Coulomb podría entonces violar el criterio de plasticidad si el producto $\mu\sigma$ es superior a

la tensión límite de cizalladura $\gamma\tau$ del material. Como consecuencia, el deslizamiento del material se produce en esta zona del contacto dando lugar al fenómeno de adhesión.

1.3.2. Teoría de formación de virutas en metales

En exámenes microscópicos se ha visto que las virutas se producen debido a la deformación cortante que ocurre a lo largo de la zona de cizallamiento, (que normalmente se denomina plano cortante). Este plano forma un ángulo ϕ (ángulo del cortante) con la superficie de la pieza. El ángulo ϕ posee gran influencia sobre la calidad de la pieza maquinada (Groover, 2010).

Las clases de virutas producidas (figura 1.3) afectan de manera significativa al acabado superficial y a las condiciones generales de corte (por ejemplo: tiempo de vida de la herramienta, vibraciones), se debe de tomar en cuenta los diversos tipos de virutas obtenidas durante el proceso de maquinado.

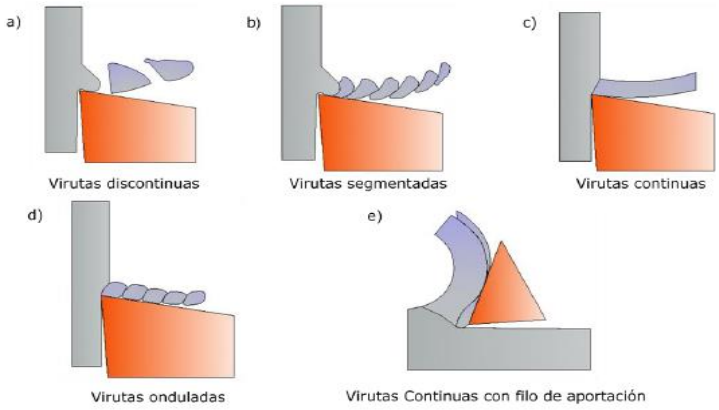


Figura 1.3 Tipos de viruta. Fuente: Merchant (1945).

Según Armendia *et al.* (2010), la viruta tiene dos superficies características. La primera, pertenece a la zona de la viruta que se encuentra en contacto con la cara de ataque de la herramienta. Se caracteriza por tener un aspecto bruñido debido al intenso contacto con la superficie de la herramienta. La segunda superficie, se origina por el desprendimiento de material en la pieza de trabajo. Esta no tiene contacto alguno con la herramienta de corte y presenta una superficie con aspecto rasgado y áspero.

Con relación al proceso de mecanizado, la dirección del flujo de viruta, dos herramientas de diferentes formas, en el mecanizado sobre una misma pieza, producirán virutas de diferentes aspecto geométrico-morfológico (cortas, largas, rectas, curvadas, helicoidales, espiraladas) y diferentes direcciones de flujo.

Armendia *et al.* (2010b), con objeto de estudiar más profundamente la influencia de la microestructura en la maquinabilidad analizaron dos aleaciones de titanio tras recibir 4 tratamientos térmicos diferentes. Para ello realizaron ensayos de torneado cilíndrico que permitieron definir la vida de la herramienta al mecanizar cada material. De la misma manera, se aplicó un captador dinamométrico y una cámara termográfica para medir fuerzas y temperaturas en corte ortogonal, respectivamente. De estos ensayos, se extrajeron muestras de viruta que, tras su correspondiente preparación metalográfica, fueron observadas en un microscopio óptico.

Todas las virutas presentaron una segmentación con claras bandas de cizalladura adiabática. Este tipo de viruta es habitual en él mecanizado de aceros a muy altas velocidades, pero en el titanio se observa que aparece a velocidades muy bajas (40 $m \cdot min^{-1}$). El fenómeno de segmentación provoca unos esfuerzos tanto térmicos como mecánicos de naturaleza cíclica que son muy perjudiciales para el comportamiento de la herramienta de corte.

Parte de la complejidad de este proceso radica en que las condiciones de contacto mecánico y físico entre la herramienta y la pieza influyen notablemente en la formación de la viruta. De hecho, se observa que cambiando el tipo de material de la herramienta (o él de la pieza) así como cambiando algunas de las condiciones de corte (por ejemplo la velocidad de corte, la profundidad de corte, el ángulo de desprendimiento), los mecanismos de generación de la viruta pueden cambiar pasando de ser continua a serrada o segmentada (rotura del material).

Por otra parte, cerca del filo de la herramienta se producen zonas de carga extrema con elevados valores de deformación, de velocidad de deformación y de temperatura y generación de nuevas superficies libres (superficie mecanizada). La formación de la viruta también depende de las condiciones de corte del problema (Ángulo de corte, ángulo de desprendimiento, avance, velocidad de corte, rigidez de la máquina).

Mallock (1881) publicó en 1881, que la formación de la viruta es debido al fenómeno de cizallamiento del material en la zona primaria. Gracias a unas observaciones realizadas con un microscopio óptico que sólo aumentaba 5x el tamaño de los objetos, Mallock estableció otro principio importante del mecanizado: la fricción entre la herramienta y la viruta es determinante en el proceso de la formación de la viruta. Por otra parte, Childs

(2006) indica en su libro que Mallock (1881-82) propuso en sus trabajos la idea de que la viruta tenía un espesor que minimizaba la energía de fricción. Esta idea es parecida a la hipótesis formulada por Merchant más de 60 años después.

Bäker (2005) constata que el principio de minimización de la energía juega un papel muy importante en la formación de la viruta, particularmente en su segmentación a altas velocidades de corte, pero que ese principio no determina el valor del ángulo principal. A pesar de basarse en las mismas condiciones que las expresadas previamente por Merchant, los resultados de Bäker no se corresponden con los de Merchant, porque el modelo analítico de este último cuenta con un defecto importante en la definición de la cinemática de la formación de la viruta. Ese detalle ha sido discutido por Molinari y Moufki (2008) que consiguieron identificar el fallo en el modelo analítico y corregirlo.

1.3.3. Importancia de las virutas producidas por los procesos de mecanizado

Los Dispositivos de Parada Súbita **(**DIS) de los procesos de mecanizado se definen como instrumentos de investigación, cuya finalidad es la obtención de raíces de viruta para el análisis y el estudio experimental; la raíz de viruta a su vez, se define como una hoja de material parcial o totalmente formado y aun adherido al material de trabajo. Se considera que al interrumpirse casi instantáneamente el proceso de corte de forma correcta, la microestructura que presenten las raíces de viruta deberá ser representativa del cambio microestructural que sufre el material de la pieza durante la dinámica del mecanizado (Zeb ,2010; Chem, 2005; Griffiths, 1986).

Los orígenes del análisis de las raíces de viruta se remontan a las investigaciones hechas por el reconocido padre de los Principios de la Administración Científica, el ingeniero Frederick Winslow Taylor. En tales investigaciones, él mismo relata que se invirtieron 26 años de dedicación en la realización de experimentos en los cuales se gastaron varias toneladas de acero en ensayos de mecanizado, que finalmente le permitieron hacer grandes aportes a la industria metalmecánica, como desarrollar un nuevo material de herramienta de corte revolucionario para la época, conocido actualmente como el acero rápido (Taylor, 1906; Groover, 2010; Kockle, 2011; Childs, 2000).

Las investigaciones también permitieron elaborar una serie de recomendaciones sobre las geometrías más convenientes para las herramientas de corte, ayudaron a formular las ecuaciones para el cálculo del fin de vida de las herramientas y hasta se hicieron

recomendaciones sobre cómo hacer ensayos de "maquinabilidad", todo esto apoyado en el análisis del aspecto de las virutas producidas por el proceso de corte con relación a los diferentes parámetros tecnológicos empleados, como la velocidad de corte, la profundidad de corte, la velocidad de avance, el material de la herramienta, el desgaste y el material de la pieza empleado. Con los experimentos se evidenció el efecto de la temperatura sobre el desgaste de la herramienta de corte, asociado al empleo de altas velocidades de corte (Taylor, 1906; Groover, 2010 y Kockle, 2011).

Históricamente se ha evidenciado que para diferentes combinaciones de parámetros de corte se producen diferentes tipos de viruta (figura 1.4). Cuando se emplean altas velocidades de corte, se generan altas temperaturas en los planos de deslizamiento que ayudan a disminuir la resistencia mecánica del material a que se facilite la formación de virutas con una forma de sierra (Kockle, 2011 y Taylor, 1906).

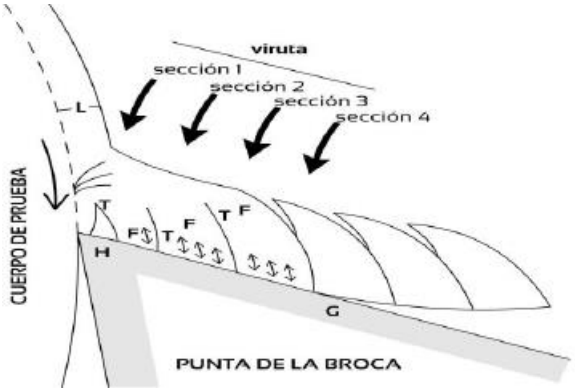


Fig. 1.4. Ilustración que muestra cómo la viruta es en parte arrancada y en parte cortada de un material forjado. Fuente: Taylor (1906).

Después de la publicación de las investigaciones de Taylor, el análisis de las virutas producidas por el proceso de corte, como herramienta o método para evaluar el desempeño del proceso de mecanizado en diferentes aspectos, ahora hace parte del repertorio de todo investigador moderno dedicado al estudio de los procesos de transformación de materia prima por arranque de viruta (Groover, 2010; Kockle, 2011 y Taylor, 1906).

Una persona común o inclusive un ingeniero que desconozca el tema de los procesos de mecanizado verá las virutas apenas como un subproducto del proceso de fabricación, mientras que el investigador experto consciente de las evidencias que encierran las virutas sería capaz, desde que cuente con los recursos necesarios, de desarrollar como lo

han hecho otros hasta el momento diferentes tipos de modelos matemáticos para las siguientes aplicaciones, a manera de ejemplo (Childs, 2000 y Van Luttervelt, 1998):

- Predicción del tiempo de vida de las herramientas de corte.
- Predicción del ángulo de cizallamiento.
- Predicción del grado de formación de la viruta y las fuerzas de corte.
- Predicción de la longitud de contacto entre la viruta y la superficie de salida de la herramienta de corte.

Otros trabajos se enfocan en comprobar los efectos que tienen ciertos elementos de aleación en la pieza de trabajo sobre la disminución de las fuerzas de corte. Otros estudian el grado de deformación plástica y el aumento de la resistencia del material por deformación al medir el grosor de la viruta. A través de la observación de las virutas también se puede verificar el efecto de las diferentes geometrías diseñadas como rompe virutas para herramientas de corte, el efecto de los diferentes tipos de revestimientos aplicables a herramientas de corte sobre la tribología de la interfase herramienta – viruta. (Kockle, 2011; Van Luttervelt, 1998; Childs, 2000 y Rech, 2003).

En la figura 1.5 se observa el análisis metalográfico realizado a una viruta con el objetivo de medir el efecto de diferentes tipos de recubrimientos aplicados pastillas intercambiables de metal duro, sobre el espesor de la viruta y el tamaño de la zona de cizalladura segundaria que se localiza en la interfase de herramienta de corte y la viruta.

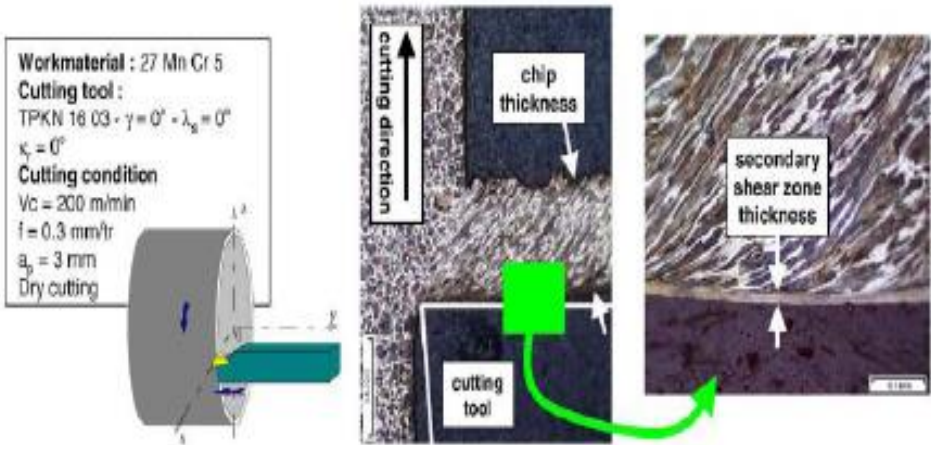


Figura 1.5. Estudio de la evolución del tamaño medio del groso de la viruta y la zona de cizalladura secundaria respecto a la variación de la velocidad de corte. Fuente: Rech (2003).

Por otro lado, mientas no se pueda realizar un análisis metalográfico a las virutas, como puede acontecer en un taller de servicios de mecanizado o en una fábrica, la simple observación de la forma y el color de la viruta puede ser de gran utilidad para deducir la temperatura del mecanizado y el tiempo de vida para la herramienta de corte.

1.3.4. Preparación de las raíces de viruta

Para poder observar su microestructura se debe proceder con el corte transversal de la raíz, para lo cual se debe aplicar un proceso de mecanizado que sea muy preciso, que no ejerza fuerzas mecánicas sobre la raíz de viruta y que no genere temperaturas elevadas que modifiquen la microestructura original de la raíz de viruta. Un proceso de mecanizado reconocido para realizar esta tarea es el proceso de electroerosión por hilo. Sí bien este proceso puede de todas formas producir algún cambio microestructural debido a la temperatura, la profundidad de este cambio se puede hacer pequeño sí se escogen adecuadamente los parámetros de remoción. Más tarde, durante el proceso de preparación metalográfica de la raíz, la superficie afectada por la temperatura se puede remover mediante operaciones de lijado y pulido.

Diferente a los procesos de mecanizado convencionales con herramientas de corte de geometría definida, como el torneado, el fresado y el taladrado, donde la herramienta debe entrar en contacto con la pieza de trabajo para generar arranque de material; en los procesos de mecanizado por herramientas de corte con geometría no definida, como el corte por electroerosión con hilo, no existe un contacto real entre la herramienta y la pieza de trabajo. En este proceso, la remoción de material acontece debido la acción de descargas eléctricas entre la herramienta y la pieza que funcionan como electrodos. Este proceso en particular se destaca por su precisión la capacidad de cortar materiales conductores de la electricidad que puedan tener una dureza muy elevada.

Una vez hecho el corte transversal en la raíz de la viruta se procede con la preparación metalográfica de la muestra que consiste en insertar la muestra en una pastilla de baquelita o resina epoxi especial para estos procedimientos. Luego, la muestra pasa por una serie de etapas de lijado y pulido donde se emplean lijas gruesas a finas hasta dejar la superficie de la muestra especular y sin ninguna ralladura. Cuando se obtiene un pulido como este, la muestra se ataca con ácido para revelar su microestructura y hacerla

observable a través de un microscopio que tenga adaptada una cámara fotográfica para la toma de micrografías (Chern, 2005).

En la figura 1.6 se puede observar el ejemplo de una micrografía de una raíz de viruta.

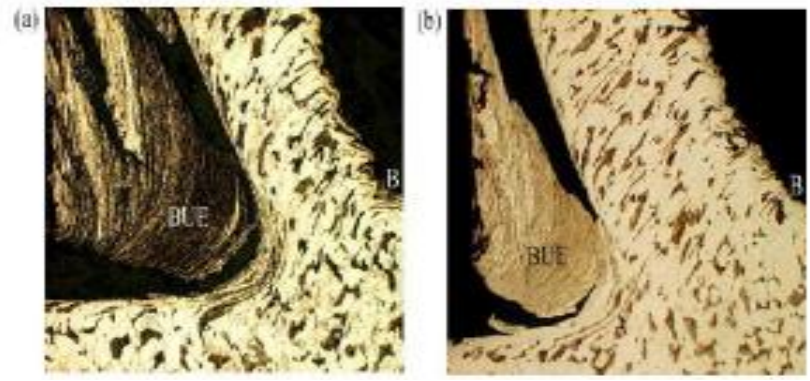


Figura 1.6. Micrografía de la sección transversal de una raíz de viruta en la cual se puede observar un fenómeno de acumulación de material en la interfase de la superficie de salida de la herramienta y la viruta, conocido como "filo postizo" o por la siglas en inglés (BUE) (Chern, 2005).

Adicionalmente, los análisis metalográficos se pueden complementar con mediciones de microdureza Vickers y análisis químicos.

Otro de los dispositivos de interrupción súbita de los procesos de mecanizado, conocidos por sus siglas en inglés como *Quick Stop Devices (QSD)*, son considerados instrumentos de investigación del área de fabricación de componentes por procesos de arranque de viruta, ya que en la actualidad, sólo a través de estos se posibilita obtener evidencia confiable acerca de los efectos microestructurales de la herramienta de corte y el material de trabajo durante el proceso de mecanizado (Dolinšek, 2003; Griffiths, 1989; Philip, 1971 y Chern, 2005).

Dicha evidencia permite entender cómo operan las variables tecnológicas de los procesos de mecanizado, entre ellas, los parámetros de corte, la geometría de la herramienta y el fluido lubricante - refrigerante empleado, y como dichos elementos afectan la eficiencia del proceso de mecanizado debido a los efectos que estos parámetros tecnológicos tienen sobre los cambios potenciales de las propiedades mecánicas que sufre la pieza de trabajo y la herramienta de corte, producto del calor y los esfuerzos existentes entre dichos elementos interactuantes (Zeb, 2009).

El entendimiento integral de las variables tecnológicas intervinientes en el proceso de mecanizado y de la microestructura del material de trabajo, permitirán desarrollar mejores herramientas de corte, máquinas herramienta con mejor desempeño, estrategias de mecanizado más efectivas e incluso el diseño de nuevos materiales que faciliten el mecanizado de componentes con propiedades mecánicas y aplicaciones específicas. Más tarde, los desarrollos técnicos que fueron producto de los proyectos de investigación y desarrollo se orientan a optimizar los procesos de mecanizado y la disminución de los costos de fabricación de componentes (Zeb, 2009 y Van Luttervelt, 1998).

1.4. Proceso de mecanizado en corte ortogonal

En 1945, Merchant (1945) publicó el primer modelo predictivo centrado en la operación de arranque de material. Este modelo sigue siendo hoy uno de los más importantes y de los más utilizados en el ámbito académico. Merchant se centró en el corte ortogonal, con lo que su modelo se basa en un análisis bajo la hipótesis de flujo de material en el plano perpendicular al filo de corte (deformación plana), como se observa en la figura 1.7. El material fue considerado de tipo plástico perfecto y el contacto entre la viruta y la herramienta fue definido como totalmente deslizante bajo una relación de tipo Coulomb con un coeficiente de fricción constante.

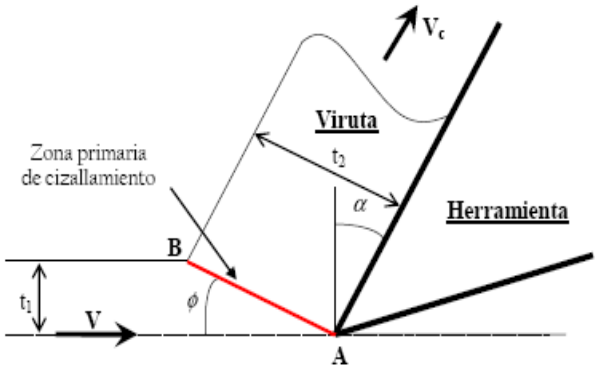


Figura 1.7: Modelo de corte ortogonal. Fuente: Merchant (1945).

La hipótesis más importante de este modelo era que la formación de la viruta se originaba en el plano de espesor infinitesimal (AB), llamado zona primaria de cizallamiento, donde el material cambia instantáneamente de dirección. Esta hipótesis proviene en realidad de las observaciones experimentales publicadas por Ernst (1938) en 1938. El plano (AB) define con la dirección de corte el ángulo de cizallamiento ϕ y Merchant (1945) propone que el ángulo de cizallamiento ϕ minimiza la fuerza de corte.

Oxley (1989) desarrolló un modelo termomecánico considerando un comportamiento termo-visco-plástico para el material además de definir un espesor no infinitesimal para la zona primaria de cizallamiento. Así mismo, definió en la interfase un contacto de tipo no plástico donde la materia no se desliza sobre la herramienta. Esta hipótesis tiene como consecuencia la aparición de la zona secundaria de cizallamiento, figura 1.8. Es importante destacar que este modelo de corte ortogonal considera la fricción como un fenómeno de cizallamiento del material dentro de la viruta a lo largo de la zona de contacto.

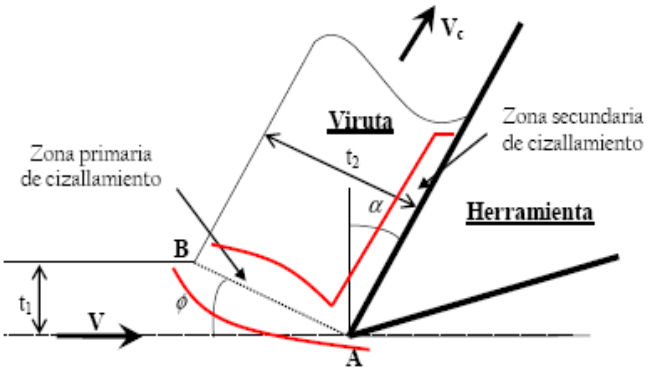


Figura 1.8. Modelo de corte ortogonal. Fuente: Oxley (1989).

Existen otros modelos analíticos de corte ortogonal desarrollados para predecir las fuerzas de corte. Los más populares dentro de la comunidad científica son los de Lee y Shaffer (1951). El modelo de Lee y Shaffer fue publicado en 1951. Este modelo, desarrollado después por Kudo (1965) y luego también por Dewhurst (1978) (mejorando la predicción de la curvatura de la viruta), se centra en el estudio de la formación de la viruta, a través de un análisis de la respuesta de tipo plástico del material.

En el modelo, Lee y Shaffer (1951) suponen un espesor infinitesimal de la zona primaria como en el modelo de Merchant y consideran el material de la pieza como rígido-plástico perfecto despreciando los efectos del endurecimiento y de la velocidad de solicitación en la respuesta del material. La principal aportación de este modelo es que considera un contacto plástico en la interfase. Concretamente, en este modelo el valor de la fricción se considera en términos microscópicos, definiendo un coeficiente de fricción medio a lo largo de la interfase.

1.5. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ La formación de viruta es un proceso tecnológico muy presente en la industria actual, ya que la misma es producto de los procesos de maquinado, la importancia de fabricación, es una necesidad estratégica de desarrollar, cada vez más, la tecnología de las máquinas - herramienta propias a este proceso.
- ✓ En los aspectos geométricos del proceso de formación de la viruta, se obtiene un gradiente de velocidad en el espesor de la viruta, donde el flujo de la misma describe un movimiento de sólido rígido. El gradiente de velocidad es la consecuencia del movimiento angular de salida de la viruta, que caracteriza su curvatura.
- ✓ Se pudo determinar en el análisis bibliográfico que el estudio de los tipos de virutas que se generan en el proceso de mecanizado permite determinar la predicción del tiempo de vida de las herramientas de corte, predicción del grado de formación de la viruta y las fuerzas de corte.

Capítulo 2
Materiales y métodos

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

La deformación plástica, llamado también ‘‘acritud’’, es un fenómeno que ocurre en materiales trabajados en frio, en la superficie del material donde se aplica una fuerza que excede el límite de resistencia a la deformación. La obtención de piezas por el método de arranque de virutas, es uno de los métodos más utilizados en la solución a problemas de ingeniería en las industrias de nuestro país.

El objetivo de este capítulo es establecer el procedimiento metodológico para la caracterización del fenómeno de la acritud en diferentes tipos de virutas obtenidas por corte ortogonal en el acero AISI 1045, en correspondencia con los regímenes de corte establecidos.

2.2. Composición química del acero AISI 1045

La composición química estándar de esta aleación según Alloy Casting Institute (ACI), muestra la designación adoptada por la ASTM, de la American Society for Testing Materials – ASTM y la SAE, se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química del acero AISI 1045, en %

Acero	C	Mn	P	S	Si
AISI 1045	0,43 - 0,50	0,6 - 0,9	0,04 máx.	0,05 máx.	0,2 - 0,4 máx.

Puede ser mecanizado fácilmente en estado recocido, normalizado o templado. El acero 1045 presenta la siguiente maquinabilidad:

En estado calibrado = 55 %
En estado recocido = 68 - 70 %

Presenta un buen acabado superficial y su mecanizado se caracteriza por presentar una larga vida útil de la herramienta de corte, donde los elementos azufre y carbono permiten obtener estas propiedades.

Para el proceso de deformación es más conveniente realizar el análisis en número de átomos y su volumen. En 100 átomos de la aleación hay 2 átomos de carbono; 0,5 átomos de silicio y 96 átomos de hierro. Como la celda del Fe es cúbica centrada en el cuerpo Fe-α

(2 átomos de Fe), entonces a la celda están asociados 0,041 átomos de carbono, que es la unidad del conjunto de los elementos aleantes; el 0,081 es el resto de átomos de elementos.

Es la diferencia en diámetros atómicos lo que va a permitir al elemento de átomo más pequeño difundir a través de la celda del otro elemento de mayor diámetro. Por lo antes expuesto se considera que al someter a compresión la superficie de la aleación durante el proceso de maquinado, existen deformaciones reticulares en la estructura interna de la aleación AISI 1045, hay un nuevo acomodo de dichos átomos y nuevas relaciones de los parámetros de la celda unitaria, lo que incrementa la dureza y la dirección de los granos.

2.3. Modelo del corte ortogonal para la obtención de las virutas

La interacción térmica entre la herramienta y el conjunto viruta/pieza es parte de la modelización del contacto. En un proceso de corte, hay dos fuentes principales de generación del calor: por deformación plástica en las zonas primaria y secundaria de cizallamiento y por fricción en la zona de contacto herramienta viruta/pieza. El modelo empleado para la obtención de la viruta, como se muestra en la figura 2.1, fue el de corte ortogonal.

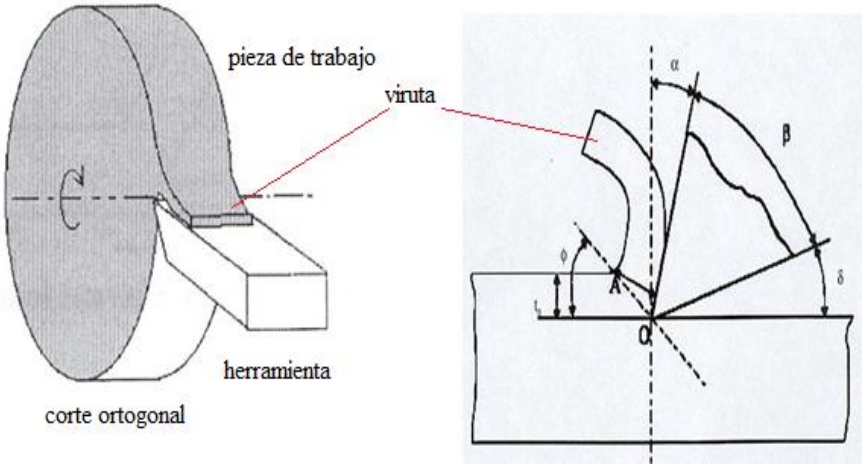


Figura 2.1. Modelo de corte ortogonal.

Las superficies a examinar son el resultado de la operación de cilindrado en el torno para la obtención de los diferentes tipos de virutas, las cuales son obtenidas a través del corte ortogonal. Se empleo un torno universal modelo C 11 MT. El proceso se realizó maquinando la pieza al aire donde se cumplió la condición de que la longitud no excediera dos veces el diámetro de la pieza. La instalación fue en el plato de tres muelas

autocentrantes, el mecanizado fue en seco, para ello se tuvo en cuenta: material de la pieza y material de la herramienta y la interacción entre la pieza y la herramienta.

2.3.1. Planificación experimental para la obtención de las virutas

Es importante que el diseño sea lo más simple, pero además, existe el problema de que la investigación se debe conducir de forma tal que sea económica y eficiente, se debe hacer todo esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental (Hendry *et al.*, 1973; Hlavacek, 1978; Westerberg, 1980 y Chacín, 2000). En la tabla 2.2 se muestra la matriz de planificación de los experimentos.

Tabla 2.2. Matriz de planificación de los experimentos

	Variables			Salida			Salida		
	n_r (rev/min)	t (mm)	s (mm/rev)	H (HV)			Microestructuras		
-	54	7	0,25						
Δ	75	7	0,43						
÷	110	5	0,25						
+	300	5	0,35						
Ensayo	Corridas experimentales								
1	-	-	-	HV1	HV2	HV3	M1	M2	M3
2	Δ	Δ	Δ	HV1	HV2	HV3	M1	M2	M3
3	÷	÷	÷	HV1	HV2	HV3	M1	M2	M3
4	+	+	+	HV1	HV2	HV3	M1	M2	M3

Para la obtención de los tipos de virutas se sometió a proceso de maquinado el acero con las diferentes variables, para cada parámetro se realizaron tres réplicas, por lo que el total de corridas experimentales fueron 12. El objetivo fue determinar la microdureza y la microestructura final.

2.3.2. Número de revoluciones por minutos del husillo

Se emplearon número de revoluciones por minutos de 54, 75, 110 y 300 rev/min, lo que permitió variar las propiedades mecánicas por giros, así como el comportamiento microestructural final. Teniendo en cuenta cada número de revoluciones del husillo, se podrá conocer la magnitud total de la deformación obtenida en la viruta. La selección del número de revoluciones permite evaluar el comportamiento de la pieza en todos sus puntos, ya que cualquier punto hace por minuto el mismo número de revoluciones.

2.3.3. Avance de la herramienta

El avance está limitado por las fuerzas que actúan durante el proceso de elaboración de la pieza. Es una variable que define el comportamiento de la viruta arrancada luego del proceso de maquinado, se relaciona con los parámetros de dureza. Los avances recomendados en la elaboración de aceros con medio contenido de carbono están en el rango de 0, 05 a 2,8 mm/rev, según Feschenkov y Majmutov (1989).

La separación de la viruta en el mecanizado provoca un fuerte rozamiento de la herramienta contra la pieza, transformándose parte de la energía en calor. Tanto el rozamiento como el calor son causas inmediatas del desgaste de las herramientas.

2.3.4. Profundidad de corte

Es la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta; generalmente se designa con la letra "t" y se mide en milímetros en sentido perpendicular, para determinar las características de las virutas se emplearán profundidad de corte desde 5 hasta 7 mm. En el torno C 11 MT puede realizarse mecanizado hasta 20 mm de profundidad en una sola pasada.

Las variables seleccionadas se definen según se aumenta la sección de la viruta, debe disminuirse la velocidad de corte, para que la duración del afilado de la herramienta sea la misma. Sin embargo, tal reducción no es proporcional ni con el avance, ni con la profundidad de pasada. Para la misma duración del afilado, con el aumento del avance en el 50 %, sólo es necesario reducir la velocidad de corte en un 20 %, incluso con mayor producción de viruta. Otro tanto sucede si se aumenta la profundidad de pasada en un 50 %, con una disminución del 10 % de la velocidad de corte.

2.3.5. Dureza superficial

La dureza es uno de los parámetros más importantes de los materiales, se admite también que es el más relevante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y a la fatiga por contacto superficial (Rodríguez, 2009). Esta variable define el comportamiento del proceso, se medirá al concluir el proceso de maquinado.

2.3.6. Comportamiento microestructural

El comportamiento microestructural permite determinar la deformación reticular del acero luego de estar sometido a un proceso de deformación, el tamaño de grano y el efecto de la acritud. La acción de la fuerza de corte, el avance, el número de revoluciones y el proceso de mecanizado en condiciones sin lubricación, generan deformaciones en las virutas, el contacto interfase herramienta - pieza y el calentamiento en esta zona varían la estructura inicial del material.

2.4. Microestructura del acero AISI 1045

La muestra de la figura 2.2, con dureza de 170 HB y un tamaño de grano 5 (ASTM E 112), se corresponde con la estructura metalográfica de la muestra patrón del acero AISI 1045.

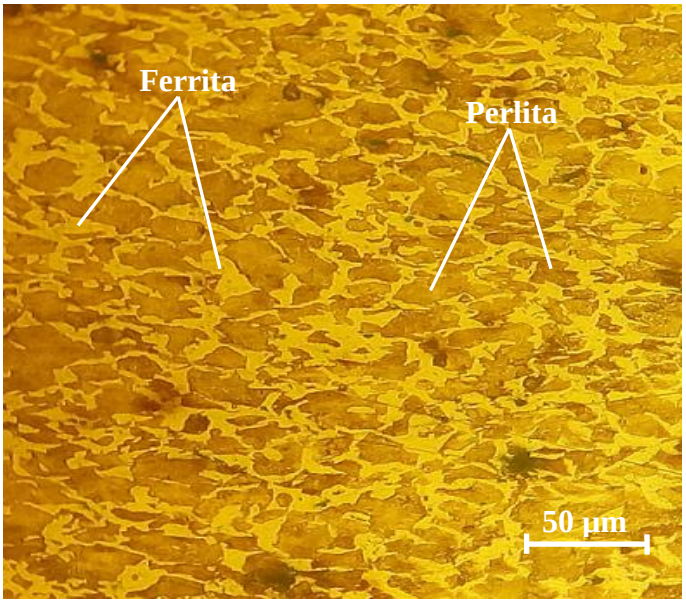


Figura 2.2. Microestructura del acero AISI 1045.

Los dos constituyentes de la microestructura (ferrita - perlita), al ser sometido a proceso de compresión, por las características propias de la ferrita de poseer una mayor ductibilidad que la perlita, provoca que el efecto de la fuerza aplicada conlleve a una deformación inicial, deformándose con facilidad, característico de aceros hipoeutectoide, como el AISI 1045, con el incremento de la fuerza, aumenta la densidad de las dislocaciones y de hecho, la deformación plástica con un mayor endurecimiento.

Estructuralmente, la perlita es una mezcla mecánica formada por planos de ferrita más cementita secundaria, menos dúctil que la ferrita, por lo tanto el endurecimiento se obtiene

con pequeñas magnitudes de fuerza, pues la misma aplicada durante más tiempo provocará una deformación plástica. La ferrita, respecto a la perlita, presenta mayor plasticidad y posibilidades de deformación al poseer menor cantidad de carbono.

Según Taylor (1963), el endurecimiento de estos dos constituyentes proviene de las interacciones elásticas entre las dislocaciones, es un proceso que envuelve interacciones elásticas entre las dislocaciones que se mueven en un plano de deslizamiento, aquellas que interceptan dicho plano ilustran los bosques con una alta densidad de dislocaciones.

2.5. Preparación metalográfica

En la preparación metalográfica se realizaron los procedimientos para la preparación de las muestras de las virutas obtenidas del proceso de maquinado del acero AISI 1045, teniendo en cuenta previamente que una preparación defectuosa de la probeta puede dañar los bordes del grano, originar dislocaciones en la superficie de la muestra y dar una lectura falsa de la verdadera realidad. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Selección del material.
2. Corte de la muestra.
3. Montaje de la probeta.
4. Ataque químico de la probeta.
5. Análisis microscópico.
6. Obtención de la micrografía.

2.5.1. Área para la selección de las muestras

Las selecciones de las muestras se realizaron mediante las operaciones de corte ortogonal de una barra de acero AISI 1045, variando los parámetros tecnológicos de la máquina (avance, profundidad de corte y número de revoluciones). Se consideró durante el proceso de maquinado la selección de diferentes tipos de virutas, para ello se consideró el rendimiento de la herramienta, lo cual es la cantidad de viruta, expresada en dm^3 o también, en kg, que una herramienta puede cortar entre dos afilados consecutivos.

Se analizará el mecanismo de formación de virutas. El modelo de corte propuesto por Merchant llamado modelo de Corte Ortogonal simplifica muchas de las complejidades

geométricas y describe la mecánica de los procesos con buena precisión. En la figura 2.3 se muestra el proceso de maquinado para la selección de las virutas.

Figura 2.3. Instalación de la pieza a maquinar.

El material es una barra de acero AISI 1045 de 50 milímetros de diámetro y 250 milímetros de longitud. Para realizar el corte se utilizó una cuchilla con plaquita del tipo T 15 K 6 con el mango de acero al carbono (AISI 1045) de 25 X 16. La selección del mango con estas dimensiones se fundamenta en que los mangos rectangulares soportan mejor la flexión que los mangos de sección cuadrada. En la tabla 2.3 se muestran los parámetros geométricos de la cuchilla seleccionada.

Tabla 2.3. Parámetros geométricos de la cuchilla

Material de la pieza	Cuchilla	Parámetros Geométricos						
		ϑ	ϑ_1	γ	α	α_1	λ	r (mm)
Acero AISI 1045 laminado HB 170	T 15 K 6	45	10	-5	6	6	-10	0,6

Los ángulos característicos, que determinan la llamada "forma geométrica" de la herramienta, se seleccionaron en correspondencia con la influencia del material de la herramienta y de la pieza, ya que el desgaste de las herramientas es causado directamente por el rozamiento y por la elevación de la temperatura. De ello se deduce que la duración del afilado depende de la dureza de la herramienta y de la temperatura, hasta que se conserve dicha dureza. Esta propiedad del material que se trabaja, mientras más duro es un material mayor resistencia opone a ser cortado y por tanto, el rozamiento de la herramienta contra la pieza aumenta y con él, la temperatura.

La capacidad de penetración de la cuchilla en el material será tanto mayor, cuanto menor sea el ángulo de corte, ya que disminuye la fuerza necesaria para deformar la viruta.

2.5.2. Selección de las muestras

La selección de las diferentes muestras a examinar (virutas) se realizó de forma tal que la mismas fueran representativas según los diferentes regímenes de corte. El tamaño adecuado de la probeta fue de forma tal que permitió que pudiera someterse a los sucesivos procesos de preparación metalográfica. En las figuras 2.4 (a), 2.4 (b), 2.4 (c) y 2.4 (d) se muestran los diferentes tipos de virutas obtenidas.

Figura 2.4 (a) Virutas de 54 rev/min.

Figura 2.4 (b) Virutas de 75 rev/min.

Figura 2.4 (c) Virutas de 110 rev/min.

Figura 2.4 (d) Virutas de 300 rev/min.

Durante la ejecución del proceso se seleccionaron las muestras más representativas del proceso de corte, ya que se ejecutó la operación tres veces con los mismos regímenes de

elaboración, considerando que al someter el material a arranque de virutas, pudieran existir pequeñas variaciones en el rango de su formación.

Las muestras por ser de pequeñas dimensiones y para su análisis microestructural, fueron encapsuladas con resina epoxi ROYAPOX - 5050.

2.5.3. Encapsulado de las muestras en resina epoxi ROYAPOX – 5050

Debido a la necesidad de realizar las operaciones de desbaste y pulido las muestras se encapsularon para facilitar el manejo de las mismas. En las figura 2.5 (a); 2.5 (b), 2.5 (c) y 2.5 (d) se muestran los diferentes tipos de virutas encapsuladas.

Figura 2.5 (a) Virutas de 54 rev/min.

Figura 2.5 (b) Virutas de 75 rev/min.

Figura 2.5 (c) Virutas de 110 rev/min.

Figura 2.5 (d) Virutas de 300 rev/min.

Para realizar el análisis microestructural, en muestras pequeñas, como el caso de las virutas, los bordes de las muestras pueden deformarse, pero como en las mismas se genera un borde cortante, es consecuente conservar un ángulo de 90º en toda el área a observar, lo cual no puede ser posible sin realizarse esta operación, para que durante las operaciones de desbaste y pulido, los bordes no se distorsionen o puedan redondearse, obteniéndose una falsa observación de la imagen.

2.5.4. Propiedades de la resina epoxi ROYAPOX – 5050

La resina epoxi ROYAPOX 5050 está compuesta por dos componentes y una vez polimerizada a temperatura ambiente, forma una masa incolora, dura y algo flexible. Presenta buenas cualidades de resistencia a la humedad y buenas propiedades mecánicas y dieléctricas que conserva sus propiedades a temperaturas comprendidas entre 30 y 125 ºC. Se suministra en dos componentes separados y predosificados: ROYAPOX 5050 y endurecedor 5050.

La relación de mezcla en peso (resina/endurecedor) es de 100/40 y puede utilizarse en la impregnación o relleno de pequeños componentes electrónicos, que requieran una protección contra la humedad y los cambios de temperatura.

2.5.5. Desbaste y pulido

Para el desbaste se debe obtener una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de máquinas herramienta y papeles abrasivos. Se giró al pasar de un abrasivo a otro para ir borrando por completo las huellas del abrasivo anterior, se utilizaron la serie de abrasivos del tipo No, 250,400, según (ISO 9001).

Luego de concluir este proceso se pasa a la operación de pulido fino, en el que se empleó la pasta abrasiva conocida comercialmente como “Pasta GOI”, añadida sobre discos provistos de paños o motas. Este pulido se desarrolló de forma manual, sobre la superficie de una mota de fieltro para evitar el redondeo de los bordes de las muestras.

2.5.6. Lijado grueso y fino

Al eliminar los ángulos que podrían llegar a provocar la rotura del papel esmeril, dando paso a las primeras etapas de lijado, las cuales se realizaron con papel de lija con diferentes tamaños de granos. Para el lijado fino el proceso se trabajó con lija de tamaño de granos 600 y 1 200 respectivamente, eliminando por completo las huellas de la lija anterior. Al realizar los cambios de una lija a otra se obtuvieron nuevas rayas perpendiculares a las anteriores.

En el trabajo se utilizó el óxido de cromo para el pulido final. Una vez pulida las probetas se lavaron con agua destilada y se secaron con papel de filtro.

2.5.7. Ataque de las muestras para su examen microscópico

En el ataque se empleó el Nital, se tomó la probeta con la pinza y se sumergió con la cara pulida hacia abajo en el reactivo contenido en el cristalizador. Luego de unos segundos se extrajo, se lavó con alcohol y se secó con aire seco y caliente. En la tabla 2.4 se muestra la forma de preparación del reactivo.

Tabla 2.4. Forma de preparación y ataque de la muestra.

Material	Composición de los reactivos	Régimen de ataque químico
AISI 1045	1-5 ml de ácido nítrico (peso especifico 1,42) + 100 ml alcohol - Rectif (Nital)	Ataque químico bajo t 20 ºC durabilidad de 15 s a un minuto.

Preparado el reactivo, se vierte un poco en una cápsula en la que se introduce la probeta unos instantes, mojando la superficie pulida. Se detiene el ataque con agua y se observa la superficie. La operación se repite hasta que la superficie a examinar esté bien atacada. El tiempo de ataque es muy variable y sólo la práctica o la observación repetida de la probeta al microscopio dirán cuando debe darse por terminado.

Después del ataque se lavó la probeta de nuevo con abundante agua corriente, se secó con alcohol (absoluto) y secada al aire.

2.6. Equipos empleados en la experimentación

Entre las características estructurales están el tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras irregularidades que profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal. La selección de máquinas y equipos debe realizarse atendiendo a las características que se deseen lograr, la no alteración de las propiedades de los materiales es de vital importancia, ya que el cambio de la misma refleja una imagen distorsionada de lo que queremos obtener.

2.6.1. Pulidora metalográfica Montasupal

Ubicada en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, se utilizó para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, las muestras se desbastaron con lijas del tipo 250, 400, 600 y 1200, las características de la máquina son:

Voltaje (V)	250
Corriente (A)	2,5
Número de revoluciones (rev/min)	300 - 1 000
Potencia del motor (kW)	3,72

2.6.2. Microscopio óptico

Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular marca NOVEL modelo NIM – 100 como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6. Microscópio óptico NOVEL modelo NIM - 100.

El equipo está ubicado en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del ISMM de Moa, dotado de una cámara instalada el hardware IMI.VIDEOCAPTURE.exe (2006), que refleja la micrografía en el computador. Para observar las probetas, se nivelaron en un dispositivo con plastilina (ASTM E 3 – 95; NC 10 – 55: 86 y NC 04 – 77: 86).

2.6.3. Determinación de la microdureza

El ensayo de microdureza se aplicó para la determinación de la dureza de los volúmenes microscópicamente pequeños del material. Para el ensayo se utilizó un microscopio modelo: PMT-3 No 168, como se muestra en la figura 2.7, ubicado en el laboratorio de microscopia de minas del ISMM Moa. La superficie de la probeta se preparó de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido).

Figura 2.7. Microscopio metalográfico para medición de microdureza.

El número de dureza se determinó por el tamaño de las huellas. Para determinar la microdureza (HVN) de las probetas de análisis se realizó el ensayo para una carga de 20 g, donde se midió los diámetros de la huella de la punta de diamante con 136º, con una penetración en un tiempo de 15 segundos, las medidas se tomaron para los puntos de prueba seleccionados aleatoriamente en la superficie.

La microdureza (VHN) se calculó por la ecuación siguiente:

$$VHN = 1{,}58 \cdot \frac{P}{\bar{d}^2} \qquad (2.1)$$

Donde:

VHN - número de dureza Vickers; kgf/mm^2

1,58 - constante

P - peso; kgf

Diámetro medio = $\bar{d}^2$ (mm) $\bar{d} = \dfrac{(d_1 + d_2) + (d_3 - d_4)}{2}$ (2.2)

Microdureza promedio: $\overline{VHN} = \dfrac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2}$ (2.3)

2.6.4. Características del torno C 11 MT

En la figura 2.8 se muestra el torno empleado en la experimentación. El torno C 11 MT está ubicado en el laboratorio de máquinas herramienta del ISMMM, el mismo es empleado

para el desarrollo de las prácticas de los estudiantes. Es una máquina que reúne los requisitos de acuerdo con el sistema MADIH, por lo que permite el desarrollo de la investigación.

Figura 2.8. Torno C 11 MT.

El torno, dentro de los procesos de mecanizado, se pueden realizar diferentes operaciones como: cilindrado pasante y no pasante, roscado, refrentado, corte de piezas. Las características técnicas del mismo son:

Altura del centro sobre bancada: 215 mm.

Distancia entre punto hasta 2000 mm.

Potencia del motor Nm = 10 kW

Rendimiento del torno $\eta = 0,75$.

Frecuencia de rotación del husillo (rev/min):12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600.

Avances longitudinales (mm/rev): 0,05; 0,06; 0,075; 0,09; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 1,6; 2; 2,4; 2,8.

Avances transversales (mm/rev): 0,025; 0,03; 0,0375; 0,045; 0,05; 0,0625; 0,075; 0,0875; 0,1; 0,125; 0,15; 0,175; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1; 1,2; 1,4.

Máxima fuerza de corte axial admisible por el mecanismo de avance, Px = 6 000 MPa.

2.7. Cálculo de los regímenes de corte para el torneado

El objetivo fundamental en los Procesos de Manufactura por Arranque de Viruta es obtener piezas de configuración geométrica requerida y acabado deseado. La operación consiste en arrancar de la pieza bruta el excedente (acero sobrante) del mismo por medio de herramientas de corte y maquinas adecuadas. Los parámetros fundamentales de los regímenes de corte son: avance de la herramienta, números de revoluciones del husillo, velocidad de corte, profundidad de corte.

2.7.1. Cálculo de la velocidad de corte

La velocidad a la cual gira la pieza de trabajo en el torno es un factor importante y puede influir en el volumen de producción y en la duración de la herramienta de corte. Una velocidad muy baja en el torno ocasionará pérdidas de tiempo; una velocidad muy alta hará que la herramienta pierda el filo muy pronto y se perderá tiempo para volver a afilarla.

$$Vc = \frac{\pi.D.n}{1\,000} \tag{2.4}$$

Donde:

Vc - velocidad de corte; m/min.

D - diámetro de la pieza; mm.

n - números de revoluciones; rev/min.

$1\,000$ - factor de conversión de metro a milímetros.

2.7.2. Operación de refrentado

Consiste en la limpieza del frente de las caras de la pieza, el tiempo básico o de maquinado para esta operación se calcula por la siguiente ecuación.

$$Tm = \frac{\frac{D}{2} + Y + \Delta}{n \cdot s} i \tag{2.5}$$

$$Y = t \cdot \cot\varphi \qquad \Delta : 1 \ldots 3 \tag{2.6}$$

Donde:

Y - longitud de entrada de la cuchilla; mm

Δ - Coeficiente.

i - números de pasadas.

2.7.3. Tiempo de maquinado de las probetas

El tiempo de maquinado para las probetas es el tiempo invertido por el operario en la ejecución del trabajo, también conocido por tiempo básico o tiempo total de maquinado.

$$Tm = \frac{L}{n.s}.i \qquad (2.7)$$

Donde:

Tm - tiempo de maquinado; min.

L - longitud a maquinar; mm.

s - avance; mm/rev

La herramienta ideal para una aplicación de mecanizado es la que proporciona un rendimiento predecible y los resultados deseados, al mejor costo, reduciendo el número de herramientas para una operación, resistente al desgaste.

La ecuación de Taylor para un rango de velocidad limitada permite predecir la vida útil de las herramientas. La Vc mantiene una relación exponencial con el tiempo de vida útil de la herramienta. Esta relación se puede expresar, para un rango limitado de velocidades, en forma de ecuación de Taylor para la vida de una herramienta se determina como:

$$V_c T^n = C \qquad (2.8)$$

Donde:

V_c - es la velocidad de corte; m/min,

T - es el tiempo de vida que tarda en cumplirse la vida útil de la herramienta, min

n_f - es un exponente que depende de las condiciones de corte, así como de las propiedades de los materiales, para carburos, como es nuestro caso está entre 0,2 y 0,5.

C - es la velocidad de corte que corresponde a un tiempo de vida de 1 minuto.

La influencia que ejercen las variables seleccionadas en la herramienta de corte y las diferentes condiciones de mecanizado en la vida útil de las mismas se determina a partir de los regímenes de corte. En la tabla 2.5 se establecen los parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

Tabla 2.5. Parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

No	n (rev/min)	t (mm)	S (mm/rev)	T (min)	n_f	Vc m/min	C
1	54	7	0,25	14	0,35	Vc1	C1
2	75	7	0,43	9	0,35	Vc2	C2
3	110	5	0,25	7	0,35	Vc3	C3
4	300	5	0,35	6	0,35	Vc4	C4

De la tabla 2.5 se puede observar que el avance es el parámetro que tiene mayor influencia en el tiempo de vida útil de la herramienta sobre la pieza mecanizada. Un aumento de n_f representa que la herramienta posee mejores características sobre la resistencia al desgaste.

La combinación de las condiciones de corte, el material de la herramienta y material de la pieza de trabajo, influyen de manera cuantificable en las constantes de la ecuación de Taylor. Las clases de virutas producidas afectan de manera significativa al acabado superficial y a las condiciones generales de corte (por ejemplo: tiempo de vida de la herramienta, vibraciones), se debe de tomar en cuenta los diversos tipos de virutas obtenidas durante el proceso de maquinado.

2.8. Conclusiones del capítulo 2

- ✓ Se establecieron los procedimientos para caracterizar el comportamiento microestructural y la microdureza luego de ser sometida a proceso de maquinado con arranque de virutas mediante el mecanizado en seco por corte ortogonal.
- ✓ A partir de las condiciones de obtención de las diferentes virutas, en lo referente a tamaño y formación de filo cortantes, para garantizar la microdureza, el análisis microestructural y en correspondencia con el espesor de las muestras, las mismas fueron encapsuladas con resina epoxi ROYAPOX 5050, de esta forma se evitará la distorsión de los bordes de las piezas.
- ✓ La selección de las variables número de revoluciones por minutos del husillo, el avance de la herramienta y la profundidad de corte, pueden ser evaluadas para determinar la microdureza y la microestructura final de la virutas obtenidas del proceso de maquinado de la aleación AISI 1045.

Capítulo 3
Análisis de los resultados

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

El estudio de las variables y efectos derivados del mecanizado provee herramientas de conocimiento tendientes a optimizar el uso de las mismas y los procedimientos de maquinado industrial. Para dar respuesta al desafío de mantener bajos costos, las grandes empresas, con el apoyo de grupos de investigación y desarrollo de institutos de investigación, destinan importantes recursos para liderar estudios en el área de los procesos de manufactura, con el fin de definir estrategias o métodos que disminuyan los costos de fabricación.

El entendimiento integral de las variables tecnológicas intervinientes en el proceso de mecanizado y de la microestructura del material de trabajo, permitirán desarrollar mejores herramientas de corte, máquinas herramienta con mejor desempeño, estrategias de mecanizado más efectivas e incluso el diseño de nuevos materiales que faciliten el mecanizado de componentes con propiedades mecánicas y aplicaciones específicas.

El objetivo del capítulo es establecer los regímenes de mecanizados durante el corte ortogonal del acero AISI 1045, así como los cambios microestructurales en las diferentes virutas que se originan por efecto de este proceso.

3.2. Análisis de los regímenes de elaboración

Para entender el proceso de torneado es necesario entender una serie de parámetros que se presentan en un proceso de mecanizado, como es un proceso de formación de viruta, el objetivo final es cortar el metal para obtener una determinada forma y tamaño, esto tiene que hacerse creando virutas definidas. La eliminación total del fluido de corte provoca que la energía mecánica introducida en el proceso de corte se transforme íntegramente en calor, por lo que es necesario encontrar parámetros de corte que garanticen el desempeño de las herramientas de corte y las dimensiones geométricas finales de la pieza a mecanizar.

Para determinar el efecto de la acritud a través del comportamiento microestructural de las diferentes virutas obtenidas, se procedió a calcular los parámetros de corte ortogonal establecidos en el capítulo 2 epígrafe 2.6. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de corte que permitieron la obtención de los diferentes tipos de virutas, las ecuaciones que se tuvieron en cuenta fue la 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7.

Tabla 3.1. Resultados de los parámetros de corte

	Variables			Resultados				
	n_r (rev/min)	t (mm)	s (mm/rev)	Vc (m/s)	Tm_{ref} (min)	i	Y	Tmt (min)
1	54	7	0,25	8,4	2,5	1	7	3
2	75	7	0,43	11,7	1	1	7	1,2
3	110	5	0,25	17	1,1	1	5	1,4
4	300	5	0,35	47	0,2	1	5	0,3

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla 3.1 y los parámetros geométricos de la cuchilla establecido en la tabla 2.3 del capítulo 2, con herramientas de ángulos de ataque positivos ($\alpha = 6^o$), la transición de la viruta del material de trabajo es gradual y el material sufre menos deformación, así las fuerzas de corte disminuyen.

Con altas velocidades de corte (47 m/min) el espesor de la zona primaria de deformación se vuelve más pequeño. Las características del material que influyen en el tamaño de la zona primaria son: la resistencia, endurecimiento por deformación, la deformación y la conductividad térmica. Con relación al avance, una pequeña deformación plástica producida por un avance de la herramienta crea fisuras en la zona de deformación. Con un avance mayor de la herramienta de corte, la fisura comienza a propagarse y una porción del material se empieza a mover sobre la cara de ataque.

La facilidad con que es removido el material representa economía en la producción del componente. Los elementos químicos influyen también en el proceso de mecanizado, el azufre fundamentalmente, propicia la formación de inclusiones de sulfuro de manganeso, las cuales funcionan como elevadores de tensión en el plano de cizallamiento de la viruta, fragilizándola e iniciando la formación de grietas además de disminuir la longitud de contacto viruta-herramienta. La concentración de tensiones generada por las inclusiones depende de factores tales como: cantidad, tamaño, dureza, forma y distribución.

Sin embargo, es sabido que el efecto como concentradores de esfuerzo en la matriz está limitado a velocidades de corte bajas y medias, disminuyendo su efecto al aumentar la velocidad según lo planteado por Kiessling y Lange (1978).

Vignal *et al.* (2003) han realizados también estudios para establecer relaciones entre la fuerza de corte (entre otros parámetros de corte) con la morfología, tamaño, forma, y distribución de las inclusiones.

3.3. Análisis de la microdureza

Como el arranque de viruta se realiza mediante la penetración de una herramienta, cuyo material es de mayor dureza (60 HRC), que el de la pieza a cortar (170 HB) durante la fricción y presión, el efecto de la acritud ejerce influencia en la dureza del material. En la tabla 3.2 se muestran los resultados de microdureza obtenidos.

Tabla 3.2. Resultados de microdureza obtenidos.

	Variables			H (HV)		
	n (rev/min)	t (mm)	S (mm/rev)	Salidas		
1	54	7	0,25	260	260	261
2	75	7	0,43	230	230	231
3	110	5	0,25	235	235	234
4	300	5	0,35	228	228	228

Se observa en la tabla 3.2 que para un número de 54 rev/min existe mayor dureza que para 300 rev/min, el incremento de dureza presumiblemente esté asociado al parámetro profundidad de corte, el primero es de 7 milímetros y el último de 5 milímetros. Con mayor profundidad y un movimiento más lento de la máquina, va existir mayor deformación en el material, además a esto se le añaden dos parámetros, el maquinado en seco y la temperatura, esta última se incrementa al existir mayor tiempo de fricción. En la primera condición, se obtienen también virutas más gruesas.

Las virutas gruesas indican más disipación de energía porque la energía de deformación es mayor. Como el trabajo efectuado durante el corte se convierte en calor, también es mayor el aumento de temperatura. Estas transformaciones y variaciones de dureza ocurren mientras se efectúa el movimiento relativo entre la pieza a trabajar y la herramienta de corte. En general, la herramienta tiene dos componentes de movimiento. La primera corresponde al movimiento derivado del movimiento principal de la máquina mientras que la segunda está relacionada con el avance de la herramienta.

3.4. Análisis del comportamiento microestructural de las virutas

Mediante la combinación de cada uno de los parámetros de corte estudiados con sus respectivos niveles, se logró establecer el comportamiento microestructural de las virutas luego del proceso de corte. La fuerza de corte tangencial generada con una velocidad de corte representa una determinada cantidad de energía que es consumida en el trabajo de

deformación y de cizallamiento para generar la viruta. Además, parte de la energía es utilizada para formar la viruta sobre la cara de desprendimiento y contra el rompevirutas. Con ello se genera una cantidad de calor considerable, principalmente en tres áreas: la zona de cizallamiento, la cara de desprendimiento y la cara de incidencia del filo de corte.

3.4.1. Análisis microestructural para 54 rev/min, t = 7 mm y S = 0,25 mm/rev

Las figuras 3.1 (a), 3.1 (b) y 3.1 (c) se corresponden con el análisis microestructural para 54 rev/min, 7 milímetros de profundidad y avance de 0,25 mm/rev. Fueron realizadas tres observaciones para evitar influencias en una medición anómala.

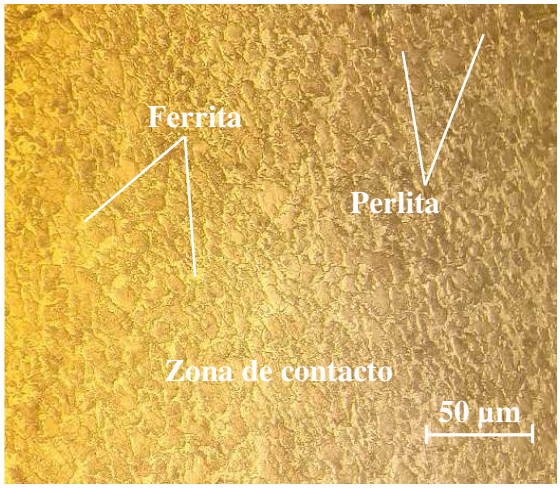


Figura 3.1 (a). 1ra observación.

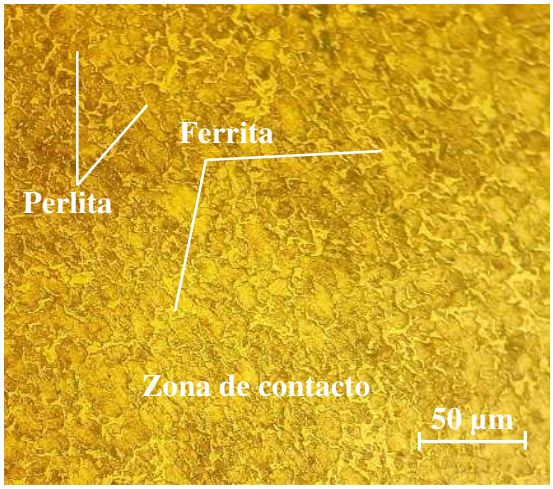


Figura 3.1 (b). 2da observación.

Figura 3.1 (c). 3ra observación.

Las microestructuras analizadas muestran diferentes orientaciones cristalinas del grano, las que contribuyen a la activación de un conjunto de sistemas de deslizamiento y se convierten

en un sistema activo que determina los niveles de deformación y tensiones locales del grano y consecuentemente con la deformación a nivel macroscópico.

En las muestras observadas, desde la 3.1 (a) hasta la figura 3.1 (c), se presenta una microestructura formada por ferrita y perlita. Se han obtenido tamaño de grano desde el número 5 (muestra patrón) hasta el número 10. Las texturas cristalográficas, en relación a la textura inicial, presentan un reordenamiento de la cristalita, donde se aprecia una agrupación ordenadas de los granos en la dirección de la tensión aplicada. Las microestructuras presentan mayor alargamiento, inducido por el avance de la herramienta y la presión que ejerce la misma sobre la pieza, lo que modifica la dimensión de la deformación en el límite del material.

Las variaciones son resultados de la deformación plástica, la cual tiene lugar por la combinación de altas temperaturas y esfuerzos mecánicos muy altos en el filo de corte. Altas velocidades de corte, grandes avances y materiales de piezas duras dan como resultado compresión y calor. A bajas velocidades de deslizamiento, el coeficiente de fricción obtenido aumenta fuertemente con la velocidad. La fricción obtenida depende fuertemente del tipo de material utilizado sobre todo a bajas velocidades, según lo expuesto por Groover (2010).

A lo largo de la zona de salida, menos energía se transforma en calor. El estado de la fina zona de fluencia entre la viruta y la herramienta se ve afectado por la continua salida de nuevas virutas y por la acción de cizallamiento en el material soldado sobre la cara de desprendimiento.

3.4.2. Análisis microestructural para 75 rev/min, t = 7 mm y S = 0,43 mm/rev

En el caso de un contacto con altas presiones, el valor de la fricción medida para un par de materiales en contacto depende de varios parámetros, principalmente del nivel de la presión aplicada pero también de la temperatura en la interfase y de la velocidad relativa de deslizamiento de un sólido con respecto al otro. Estos parámetros influyen en la morfología segmentada de la viruta puesto que el fenómeno de la segmentación se acentúa cuando aumenta la fracción de calor transmitida a la viruta. Igualmente, cuando la disipación de calor en la viruta aumenta, el radio de la curvatura de la viruta es más pequeño, estando este fenómeno relacionado con una fragmentación más pronunciada de la viruta.

En las figuras 3.2 (a), 3.2 (b) y 3.2 (c) se muestra el comportamiento microestructural obtenido del proceso de maquinado con parámetros de 75 rev/min, profundidad de 7 milímetros y avance de 0,43 mm/rev.

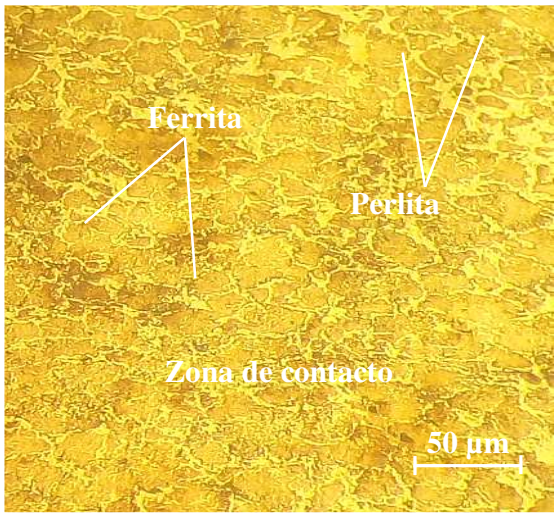


Figura 3.2 (a). 1ra observación.

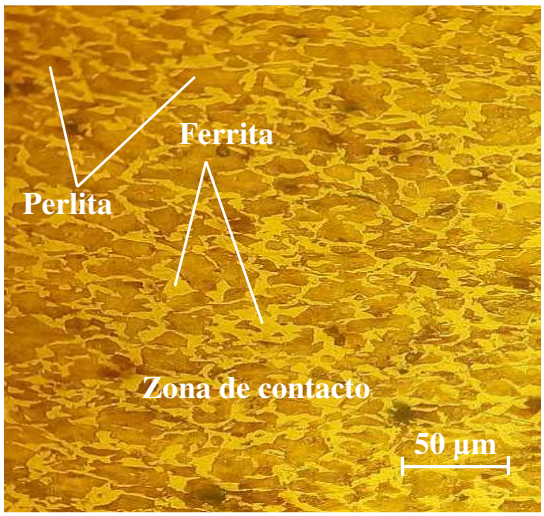


Figura 3.2 (b). 2da observación.

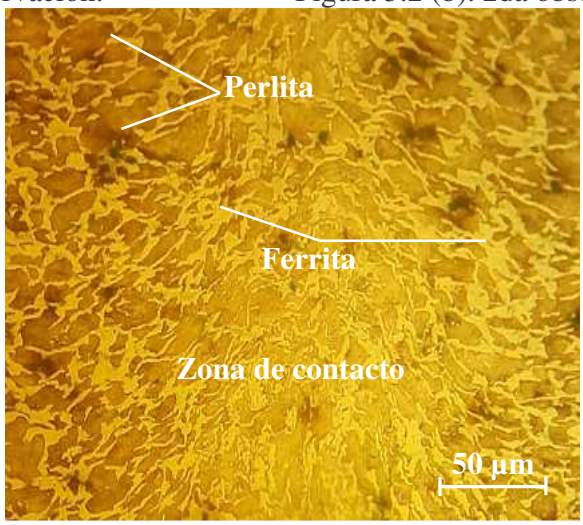


Figura 3.2 (c). 3ra observación.

En este nivel se puede apreciar una menor agrupación de los granos (número 7) en la estructura en relación con la figura 3.1. En estas microestructuras, el efecto de las texturas es menos relevante en las proximidades de la zona correspondiente a la deformación, se alcanza para la muestra 3.2 (c) en la zona de contacto un tamaño de grano número 8.

El hecho de tener una textura de gran fracción de volumen, con orientaciones distribuidas aleatoriamente, esto es posible porque durante el proceso de deformación, se logra que la distribución de los granos, por efecto del incremento de la velocidad (75 rev/min) sean más

grandes. La diferencia en los niveles de deformación en estas muestras respecto a la muestra inicial, está relacionada particularmente con el incremento de las variables. El hecho de introducir mayor frecuencia de rotación, y mayor avance sobre el acero AISI 1045, provoca que el estiramiento de los granos sea más extendido.

3.4.3. Análisis microestructural para 110 rev/min, t = 5 mm y S = 0,25 mm/rev

En relación al número de revoluciones, este se incrementó hasta 110 rev/min, según la gama de la máquina herramienta, se disminuye el avance, ya que estos dos parámetros son inversamente proporcionales. En las figuras 3.3 (a), 3.3 (b) y 3.3 (c) se muestra el comportamiento microestructural obtenido del proceso de maquinado con parámetros de 110 rev/min, profundidad de 5 milímetros y avance de 0,25 mm/rev.

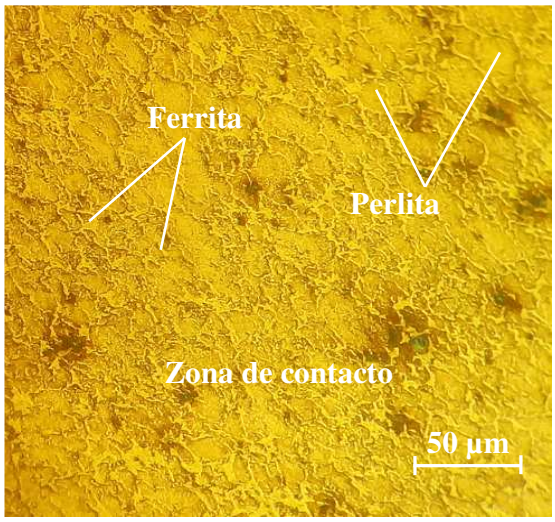


Figura 3.3 (a). 1ra observación.

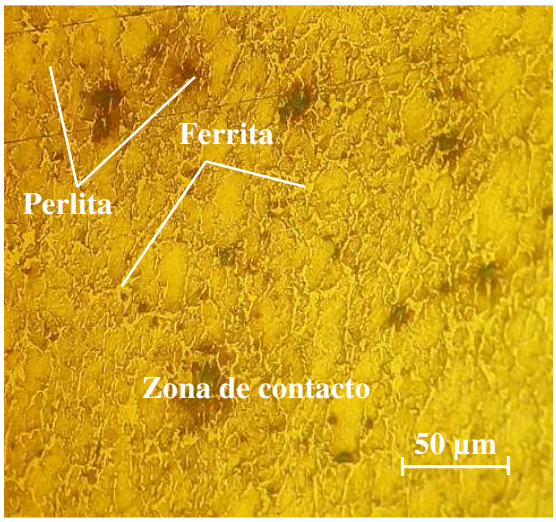


Figura 3.3 (b). 2da observación.

Figura 3.3 (c). 3ra observación.

Las microestructuras de la figura 3.3 son para el tipo de viruta fragmentada, con estas condiciones de mecanizado, las virutas comenzaban a romperse pero, la superficie de la pieza quedaba con un mal acabado, en estos casos en que el avance era considerable y las profundidades de corte eran bajas, la forma de la viruta era discontinua.

Al incrementar el número de revoluciones, entonces esta profundidad de corte es significativa y provoca efecto de vibraciones en la máquina, en estas condiciones cambia la temperatura del filo, si la temperatura del filo cambia rápidamente entre frío y calor, pueden aparecer varias fisuras en dirección perpendicular al filo. Las fisuras térmicas están asociadas a los cortes intermitentes.

Se observa que, todas las estructuras presentan el mismo microconstituyente, ferrita + perlita, pero existe variación en la dirección de los granos por efecto de la deformación, los mismos tienen una dirección preferencial hacia donde se aplica la presión y el avance. En este caso existe una disminución de la ferrita, la cual se observa de forma alargada y entre los granos de la perlita. El tamaño de grano es del número 9.

Para esta condición el desgaste alcanza un nivel donde su velocidad empieza a acelerar. Esto marca el principio de la región de falla, en la cual las temperaturas de corte son más altas y la eficiencia general del proceso de maquinado se reduce. Si estas condiciones continúan, la herramienta finalmente fallará por temperatura o por fractura. Se pone de manifiesto que tanto la continuidad de la temperatura en la interfase como la partición del calor debido a la energía de fricción, dependen fuertemente del valor de la conductividad térmica entre la viruta y la herramienta. Cuanto mayor es este valor, más calor pasa a la viruta y se aproxima mejor la condición de continuidad de temperatura en la interfase.

La dureza del acero AISI 1045 y el efecto de laminación, pueden generar durante la fricción entre la herramienta – pieza, un aumento de temperaturas que, debido a la gran influencia de este parámetro en el desgaste de las herramientas, hace que la vida útil de la arista de corte se vea reducida. También es posible que la fricción producida entre la viruta y la herramienta pueda producir una deformación secundaria en la viruta del material.

El modelo de corte ortogonal considera la fricción como un fenómeno de cizallamiento del material dentro de la viruta a lo largo de la zona de contacto.

3.4.4. Análisis microestructural para 300 rev/min, t = 5 mm y S = 0,35 mm/rev

Se obtuvieron las variaciones microestructurales para el maquinado con 300 rev/min, profundidad de 5 milímetros y avance de 0,35 mm/rev. Las figuras 3.4 (a), 3.4 (b) y 3.4 (c) se corresponden con este comportamiento.

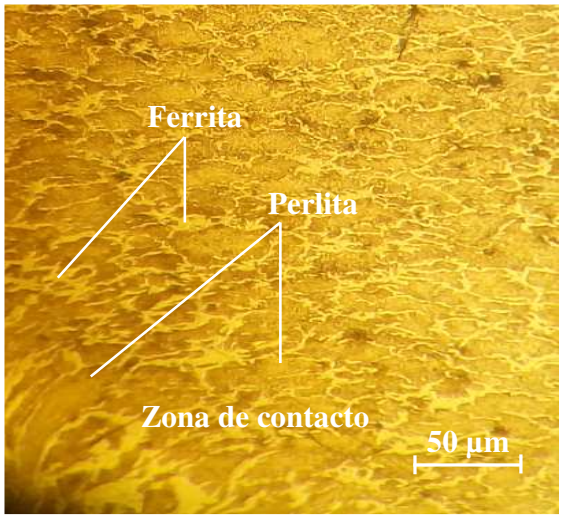


Figura 3.4 (a). 1ra observación.

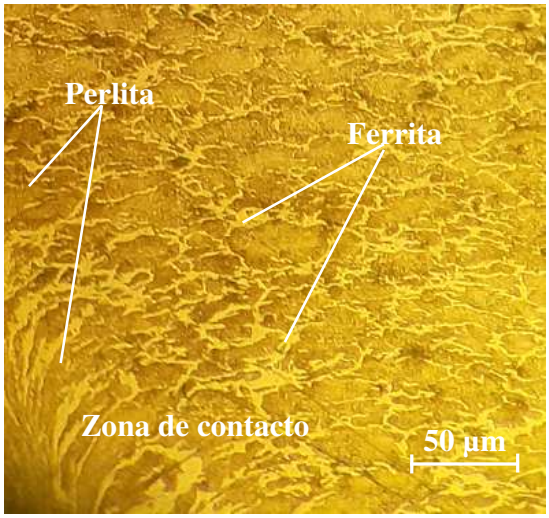


Figura 3.4 (b). 2da observación.

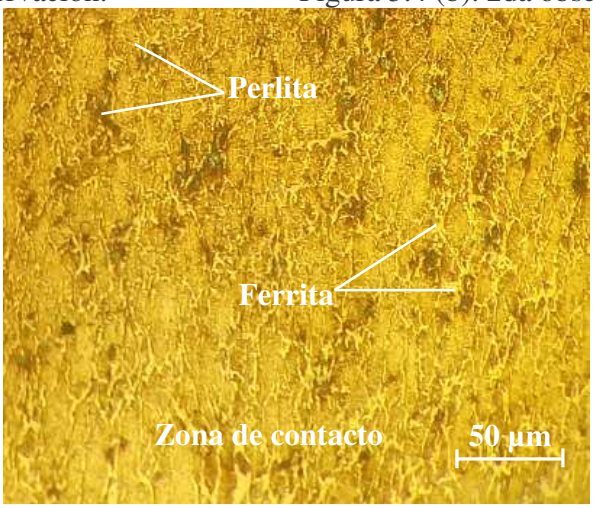


Figura 3.4 (c). 3ra observación.

Para la máxima magnitud de números de revoluciones, se observa una mayor deformación del grano en sentido del deslizamiento de las virutas sobre la herramienta. Las muestras mantienen la misma composición bifásica, pero más densa con un mejor reordenamiento de los granos, se puede plantear que la deformación plástica es acomodada por deslizamiento. La activación de los diferentes sistemas, está fuertemente asociada a las tensiones críticas de activación y la anisotropía plástica depende de la relación entre los niveles de deformación introducidos, el deslizamiento intracristalino se efectúa con esfuerzos

menores, ya que los cristales no son perfectos, sino que tienen defectos que ayudan a obtener un incremento de la deformación.

Se observa que al pasar a otro grano contiguo, la dislocación ha cambiado de dirección, por los esfuerzos adicionales, el límite de grano se comporta como una zona de gran desorden, por la discontinuidad entre los planos de deslizamiento, la dislocación no ha encontrado un camino para seguir deslizando y pasar a otro grano, quedándose entonces bloqueada en el límite de grano.

Así mismo, se puede observar que el valor, tanto del radio de curvatura de la viruta, de su espesor, como de las longitudes de contacto total y adherido, tiende a alargar los granos en la zona de contacto interfase herramienta – pieza con el aumento de la velocidad de corte. Estas variables dependen en gran medida del valor del coeficiente de fricción implementado, particularmente a bajas velocidades. A altas velocidades de corte, estos resultados tienden a acercarse a un valor asintótico.

Se pudo comprobar macroscópicamente que durante el proceso de torneado, el inserto sufría daños severos ya que sufría adhesión en el radio de nariz y cuando la profundidad de corte era mayor, las virutas salían quemadas y existía una gran generación de calor.

En el acero AISI 1045 sometido a proceso de corte ortogonal con herramienta de carburo metálico del tipo T 15 K 6, se observa una estructura bifásica de ferrita – perlita, donde existe una agrupación orientada de los granos en la superficie, los límites de los granos se hacen más finos (desde el número 5 para la muestra patrón, hasta el número 10), para número de revoluciones de 54 rev/min, profundidad de corte de 7 milímetros y avance de 0,25 mm/rev, en todas se puede apreciar la estructura en bloque de mosaico, dividida en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina.

Después de ser sometidas al proceso de torneado por arranque de virutas, en las microestructuras se nota un desplazamiento de los planos perdiendo su paralelismo, existe una distorsión en el núcleo a lo largo de los átomos que están por encima del plano de deslizamiento, además nos aporta la dirección y el sentido en el que se mueve la dislocación, siendo el plano de deslizamiento y la dirección de deslizamiento perpendicular a la línea de dislocación.

3.5. Análisis del tiempo de vida útil de la herramienta

Durante los procesos de mecanizado se genera una gran cantidad de calor en la zona de trabajo, por una parte, debido a que la energía requerida para deformar al material se convierte en calor y, por otra parte, a que también se disipa el calor producido por la fricción entre la herramienta y el material. Por la ecuación 2.8 se determinó la vida útil de la herramienta para las diferentes condiciones de torneado. En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.3. Resultados obtenidos de la vida útil de la herramienta

No	n (rev/min)	t (mm)	S (mm/rev)	T (min)	n_f	Vc m/min	C	Microestructura
1	54	7	0,25	14	0,35	8,4	21,3	Ferrita + perlita
2	75	7	0,43	9	0,35	11,7	25,4	Ferrita + perlita
3	110	5	0,25	7	0,35	17	34,1	Ferrita + perlita
4	300	5	0,35	6	0,35	47	88,2	Ferrita + perlita

Como se observa en la tabla 3.3 la vida útil de la herramienta (C) en correspondencia con la tasa de remoción de material, existe menor tiempo de vida útil, que con los incrementos en la velocidad de corte reducen la vida de la herramienta,

En relación con la vida de la herramienta, la literatura especializada recoge diversa experimentación que desaconseja el mecanizado en seco debido al excesivo desgaste generado en la herramienta en comparación con otros sistemas, como la refrigeración/lubricación convencional y el sistema MQL (Diniz y Micaroni, 2002); (Diniz y Oliveira, 2004).

Ensayos realizados mediante mecanizado en seco, sobre acero, ofrecen tasas de eliminación de virutas inferiores a las obtenidas en ensayos similares realizados empleando aceite sintético con un 6 % de concentración de agua, para distintas velocidades de corte y avances. No obstante, a medida que se incrementa el avance de la herramienta o, simplemente se mantenga el avance, se reducen las diferencias entre ambos sistemas. Asimismo, la rugosidad superficial obtenida en el mecanizado en seco mejora la obtenida mediante refrigeración/lubricación convencional (Diniz y Micaroni, 2002).

Las velocidades de corte deben ser escogidas de tal manera que la vida útil de la herramienta a la velocidad más alta no sea menor de 5 minutos (ANS, 1985) y para el análisis de volumen del material removido, la tasa de remoción de material aumenta con la

aplicación de altas velocidades de corte. El desgaste en una herramienta de corte que opera a alta velocidad se produce con mayor intensidad y hace que el cambio de la herramienta sea frecuente. El tiempo de cambio de herramienta aumenta el tiempo de inactividad de la máquina y reduce la productividad de mecanizado. Por otro lado una baja razón de material removido aumenta el tiempo de operación para una misma cantidad de volumen.

3.6. Valoración económica

Al abordar la valoración técnico económico del proceso de torneado, se parte del hecho que durante la fabricación de muestras intervienen en el mismo proceso de maquinado como: corte, preparación de muestra para análisis químico, análisis metalográfico, mano de obra, técnico de laboratorio. Todo ello sin dudas repercute económicamente en el proceso. Los costos asociados al proceso de corte se muestran en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Resultados del análisis económico, en CUP.

No	Materiales	Cantidad	Precio material (CUP)	Importe material (CUP)
1	Acero AISI 1045	2,5 kg	30,00	75,00
2	Cuchilla carburo	1 u	6,50	6,50
3	Lija de 250	0,50 u	0,44	0,22
4	Lija de 400	0,50 u	0,457	0,23
5	Lija de 600	0,50 u	0,27	0,13
6	Lija de 1 200	0,50 u	0,15	0,13
7	Resina epoxi	25 g	0,73	0,73
			Sub total	82,94

Los costos por concepto de obra directa se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de los costos de la mano de obra, en CUP.

Costos de mano de obra				
No	Especialidad	$/horas	Horas trabaj.	Costos total
1	Mecánico taller “A”	12,08	4	48,32
2	Técnico de laboratorio	6,75	10	67,5
			Sub total	**115,58**

Luego de realizado el análisis económico del proceso de torneado del acero AISI 1045 para determinar el efecto de la acritud con diferentes parámetros de corte, donde se incluyen los costos por concepto de gastos de materiales y gastos de mano de obra, se incurre en un costo total de 198,76 CUP.

3.7. Valoración del impacto medio ambiental

El interés por salvaguardar el medio ambiente donde nos movemos, trabajamos, alimentamos y vivimos es cada vez de mayor intensidad, aún más si conocemos que su contaminación podría traer como consecuencia nuestra propia destrucción. El conocimiento de la salud del medio ambiente es un factor esencial para la protección que cada hombre debe establecer sobre su entorno.

El desarrollo impetuoso de las fuerzas productivas ha implicado el incremento de los riesgos de contaminación atmosférica, de la misma manera el desarrollo vertiginoso de la industria ha creado desechos, que durante un tiempo se pensó que se podrían depositar en basureros, bien en tierra o en mar sin causar ningún perjuicio. En la actualidad comprendemos que estas acumulaciones no son más que el legado que preparamos para el futuro, que no tienen culpa alguna de la inmadurez del hombre para prever lo que podría pasar si continuáramos contaminando el entorno.

El término ‘‘contaminación atmosférica’’ hace referencia a fenómenos en la atmósfera que ocasionan daños, directa o indirectamente, a la salud humana, a los animales, a las plantas o a los materiales. Dado que el aire es el recurso natural que necesitamos de una manera más inmediata, los fenómenos de contaminación atmosférica tienen una enorme trascendencia. La peligrosidad de estos fenómenos explica la necesidad de un control estricto de las emisiones de sustancias que puedan ser responsables de los mismos, de sus niveles en el medio ambiente atmosférico y de la vigilancia de su evolución en el entorno.

Durante la preparación de las muestras, hay que elaborarla por el proceso de maquinado, en el mismo se produce gran cantidad de desechos sólidos, estos desechos en forma de virutas al ser depositados en un lugar específico alteran el equilibrio de ese pequeño ecosistema, ya que en su composición poseen elementos que pueden ser lixiviables, bajo la acción de las temperaturas altas y las lluvias, pasan a las aguas subterráneas contaminándolas. Además en el taller se consume una gran cantidad de energía eléctrica, la cual se toma de la red nacional convirtiéndose en gasto de combustible y contaminación atmosférica debido al proceso de combustión para generar energía.

3.8. Conclusiones del capítulo 3

- Se pudo establecer que para diferentes parámetros de mecanizado, la variación de los mismos influye significativamente en la formación de las virutas y esta a su vez en el desgaste del filo de la herramienta al estar en contacto con la interfase de la pieza, por lo que se requiere mayor tiempo en el maquinado de las piezas.
- A través de las microestructuras obtenidas al variar la frecuencia de rotación, la profundidad de corte y el avance, han permitido establecer el efecto de la acritud en el acero AISI 1045 sometido a diferentes condiciones de corte ortogonal en seco.
- Se estableció que el corte ortogonal considera la fricción como un fenómeno de cizallamiento del material dentro de la viruta a lo largo de la zona de contacto y las mismas se forman en correspondencia con la generación de temperatura y de fricción durante el proceso.

CONCLUSIONES GENERALES

- Al realizar el proceso de mecanizado en seco y con corte ortogonal del acero AISI 1045 con cuchilla de carburo del tipo T 15 K 6 con profundidades de corte de 7 y 5 milímetros respectivamente fueron obtenidas virutas del tipo discontinua, en espiral, fragmentadas y continuas.
- En el acero AISI 1045 sometido a proceso de corte ortogonal con herramienta de carburo metálico del tipo T 15 K 6, se observa una estructura bifásica de ferrita – perlita, donde se hacen más finos, desde el número 5 para la muestra patrón, hasta el número 10, para 54 rev/min, profundidad de corte de 7 milímetros y avance de 0,25 mm/rev, siendo el tamaño de granos del número 7 para 300 rev/min; 5 mm de profundidad y avance de 0,35 mm/rev, lo que demuestra que esta disminución es por el efecto del fenómeno de la acritud
- El análisis de microdureza en las muestras analizadas se estableció que, al emplear un número de revoluciones de 54 rev/min, en estos parámetros existe un valor de dureza de 260 HV, no siendo así para 300 rev/min, donde este parámetro es de 228 HV, el incremento está asociado a que al existir mayor tiempo de fricción entre la herramienta y la pieza, la acritud endurece esta última.
- Al realizar el análisis económico del proceso de maquinado del acero AISI 1045 para determinar el efecto de la acritud, donde interviene gastos de materiales, gastos de mano de obra se incurre en un costo total de 198,76CUP.

RECOMENDACIONES

- En próxima investigación, establecer el comportamiento del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal, pero bajo régimen de lubricación.
- Considerar determinar a través del método de los elementos finitos, el comportamiento de las tensiones en el acero AISI 1045, sometido a proceso de maquinado por corte ortogonal con el empleo de los regímenes de corte establecidos en el presente trabajo.
- Establecer un diseño de experimentos a partir de las variables consideradas en el corte ortogonal para determinar la variabilidad que se origina durante el proceso de maquinado en diferentes condiciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Armendia, M.; Garay, A.; Iriarte, L.; Arrazola, P. Análisis de la influencia del tratamiento térmico en la maquinabilidad de aleaciones de titanio. Advanced Manufacturing Research Centre with Boeing, 2010a.
2. Armendia, M.; Garay, A.; Villar, A.; Davies, M.; Arrazola, P. High bandwidth temperature measurement in interrupted cutting of difficult to cut materials. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 59 (1): 97 - 100, 2010b.
3. Arshinov, V. Alekseev G. Metal cutting theory and cutting tool design. MIR, Moscú, 115 - 125, 1970.
4. Bäker, M. Finite Element Simulation of Chip Formation, Shaker Verlag, Aachen (2004).
5. Bäker, M. Does chip formation minimize the energy? Computational Materials Science 33 (4): 407 - 418, 2005.
6. Bäker, M. Finite element simulation of high-speed cutting forces, J. Mater. Process. Tech. 176 (1 - 3): 117 - 126, 2006.
7. Beswick, J. Bearing steel technology - STP 1419, (Ed.) Philadelphia: ASTM International. 2002.
8. Chandrasekaran, H.; Thoors, H. Tribology in interrupted machining: role of interruption cycle and work material. Wear, 179 (1 - 2): 83-88, 1994.
9. Chern, G. Development of a new and simple quick- stop device for the study on chip formation. International Journal of Machine Tools & Manufacture. (45): 789 - 794, 2005.
10. Chern, G. Development of a new and simple quick- stop device for the study on chip formation. International Journal of Machine Tools & Manufacture. (45): 789 - 794, 2005.
11. Childs, T. Metal machining theory and applications (2nd ed.), Oxford Science Publications. 2000.
12. Childs, T. Friction modelling in metal cutting, Wear 260 (3): 310 - 318, 2006.
13. Childs, T.; Maekawa, K.; Obikawa, T.; Yamane, Y. Metal machining: Theory and applications. Editorial John Wiley & Sons. 2000.
14. Da Silva, M.; Wallbank, J. Cutting temperature: prediction and easurement methods a review. Journal of Materials Processing Technology, 88 (1 - 3): 195 - 202, 1999.

15. De Chiffre, L.; Belluco, W. Comparison of methods for cutting fluid performance testing. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 49 (1): 57 - 60, 2000.
16. Devillez, A.; Schneider, F.; Dominiak, S.; Dudzinski, D.; Larrouquere, D. Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. Wear, 262 (7 - 8): 931 - 942, 2007.
17. Dewhurst, P. On the non-uniqueness of the machining process, Proc. Royal Society of London A 360: 587 - 610, 1978.
18. Dhar, N.; Kamruzzaman, M. Ahmed, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI - 4340 steel. Journal of Materials Processing Technology, 172 (2): 299 - 304, 2006.
19. Diniz, A.; Ferreira, J.; Filho, F. Influence of refrigeration/lubrication condition on SAE 52100 hardened steel turning at several cutting speeds. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 43 (3): 317 - 326, 2003.
20. Diniz, A.; Gomes, D.; Braghini, A. Jr. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. Journal of Materials Processing Technology, 159 (2): 240 - 248, 2005.
21. Diniz, A.; Micaroni, R. Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (8): 899 - 904, 2002.
22. Diniz, A.; Oliveira, A. Optimizing the use of dry cutting in rough turning steel operations. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44 (10): 1061 - 1067, 2004.
23. Dolinšek, S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. Journal of Metals Processing Technology. (133): 63 - 70, 2003.
24. Ernst, H. Physics of metal cutting, Symposium of machining of metals, Trans. American Society of Metals 1. 1938.
25. Filipovic, A.; Stephenson, D. Minimum Quantity Lubrication (MQL) applications in automotive power-train machining. Machining Science and Technology, 10 (1): 3 - 22, 2006.

26. Griffiths, B. The development of a quick-stop device for use in metal cutting hole manufacturing processes. International Journal of Machine Tool Design and Research. 2 (26): 191 - 203,1986.
27. Groover, M. Fundamentals of modern manufacturing: Materials, Processes and Systems. 4ta Edición. Editorial John Wiley & Sons. 2010.
28. Kelly, J.; Cotterell, M. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. Journal of Materials Processing Technology, 120 (1 - 3): 327 – 334, 2002.
29. Klocke, F.; Eisenblätter, G. Dry cutting. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 46 (2): 519 - 526, 1997.
30. Kockle, F. Manufacturing Processes 1: Cutting. Editorial Springer. 2011.
31. Kountanya, R. Cutting tool temperatures in interrupted cutting - The effect of feed direction modulation. Journal of Manufacturing Processes, 10 (2): 47 - 55, 2008.
32. Kudo, H. Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-state machining, Inter. J. of Mechanical Science 7: 43 - 55, 1965.
33. Lazoglu, I.; Altintas, Y. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42 (9): 1011 - 1022, 2002.
34. Lee, E.; Shaffer, B. The theory of plasticity applied to a problem of machining. J. Appl. Mech. 18: 405, 1951.
35. Mallock, A. The action of cutting tools, Proc. Royal Society, London 33: 127 - 139, 1881 - 82.
36. Merchant, M. Mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting, J. of Applied Physics 16: 267 - 275, 1945.
37. Metals handbook ASM. Tradicional Machining Processes: Milling, Vol. 16, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 9na ed: 303 - 323, 1978.
38. Miguelez, H.; Zaera, R.; Rusinek, A.; Moufki, A.; Molinari, A. Numerical modelling of orthogonal cutting: Influence of cutting conditions and separation criterion, Journal de Physique IV (134): 417 - 422, 2006.
39. Molinari, A.; Moufki, A. The Merchant's model of orthogonal cutting revisited: A new insight into the modeling of chip formation, Inter. J. of Mechanical Science 50 (2): 124 - 131, 2008.

40. Oliveira, A.; Diniz, A.; Ursolino, D. Hard turning in continuous and interrupted cut with PCBN and whisker-reinforced cutting tools. Journal of Materials Processing Technology, 209 (12 - 13): 5762 - 5270, 2009.
41. Oxley, P. Mechanics of machining, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1989.
42. Pavel, R.; Marinescu, I.; Deis, M.; Pillar, J. Effect of tool wear on finish for a case of continuous and interrupted hard turning. Journal of Materials Processing Technology, 170 (1 - 2): 341 - 349, 2005.
43. Philip, P. Study of the performance characteristics of an explosive quick-stop device for freezing cutting action. International Journal of Machine Tool Design and Research. (11): 133 - 144, 1971.
44. Rech, J.; Kusiak, A.; Battaglia, J. Tribological and thermal functions of cutting coatings. Surface & Coating Technology. (186); 364 - 371, 2003.
45. Sandvik Coromant., El Mecanizado Moderno: manual práctico, AB Sandvik Coromant, Suecia, 1994. , I-30- I-35, II-38, X-2 - X-11.
46. Kalpakjian, S.; Schmid, S. Manufactura, Ingeniería y Tecnología, Cuarta Edición, México. 2002.
47. Shih, A. Finite element simulation of orthogonal metal cutting. ASME J. Eng. Ind. 117: 84 - 93, 1995.
48. Taylor, F. On the art of cutting metals. Ciudad: Editorial American Society of Mechanical Engineers. 1906.
49. TIMETAL® 54M Using Uncoated WC-Co Tools, Journal of Materials Processing Technology. 210 (2): 197 - 203, 2010a.
50. Tönshoff, H.; Kaestner, W.; Schnadt, R. Machinability of forged steels in interrupted cutting. Journal of Materials Processing Technology, 21 (2): 219 - 236, 1990.
51. Van Luttervelt, C.; Delft, T.; Childs, T.; Leeds, U.; Jawair, I.; Kentucky, U.; Kockle, F.; *et al.* Present situation and future trends in modelling ofmachining operations Progress report of the CIRP working group “Modelling of machining operations”. CIRP Annals of Manufacturing Technology. 1998.
52. Weinert, K.; Inasaki, I.; Sutherland, J.; Wakabayashi, T. Dry machining and minimumquantity lubrication. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 53 (2): 511 - 537, 2004.

53. Zeb, M.; Veldhuis, S.; Irfan, M. Material Response of Ramax-2 during high-speed machining using quick-stop device. Revista Experimental Techniques. Editorial Society for experimental Mechanics. 2009.
54. Zhong, W.; Zhao, D.; Wang, X.; Yu, H. Effects of little quantity lubrication on high speed machining. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Nanjing: 75 - 78, 2010a.
55. Zorev, N. Interrelation ship between shear processes occurring along tool face and on shear plane in metal cutting, Inter. Research in Production Engineering, ASME, New York: 42 - 49, 1963.