



**Ministerio de Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Departamento de Mecánica**

EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL ACERO AISI 1045 DURANTE EL MAQUINADO POR CORTE ORTOGONAL

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Héctor Moisés Proenza Laurencio

Tutor: Prof. Asist. Dayanis Alcántara Borges, Ms. C.

Moa /2017



Declaración de autoridad

Yo: Héctor Moisés Proenza Laurencio

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.

Héctor Moisés Proenza Laurencio

Ms. C. Dayanis Alcántara Borges



Pensamiento

La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino en la destreza de aplicar los conocimientos a la práctica.

Aristóteles



Agradecimientos

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

Al profesor Dr. C. Tomás Heraldo Fernández Columbié por su precioso tiempo, conocimiento y dedicación sin la cual no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

A mi tutora la Ms.C Dayanis Alcántara Borges por el apoyo incondicional durante la realización de este trabajo.

A mis familiares por su constante preocupación.

A mis compañeros de aula, por el empuje y la constancia mostrada durante todo este período de estudio.

Muchas Gracias.

El Autor



Dedicatoria

A mi hermano Tomás Alejandro Proenza Laurencio, a mis padres por ser las personas más importantes para mí, y en especial para mi madre Marisol Laurencio Molina.

El Autor



SÍNTESIS

El trabajo tiene como objetivo establecer el efecto de la temperatura en el acero AISI 1045 durante el maquinado por corte ortogonal sin empleo de refrigerantes de corte. Para determinar la distribución de temperaturas en este acero, se seleccionó una cuchilla del tipo T 15 K 6, con ángulo de posición principal de 45°. Se emplearon diferentes parámetros de corte como: número de revoluciones desde 54 hasta 300 rev/min, avances desde 0,25 hasta 0,43 mm/rev y profundidad de corte de 5 y 7 milímetros, los cuales influyen en el flujo de calor en las interfases herramienta - material y herramienta – pieza. Se determinó que la variación en las temperaturas fluctúan en la zona primaria y secundaria de corte entre 160 y 195 °C, las cuales pueden afectar la vida útil de la herramienta. Para 54 rev/min, avance de 0,25 mm/rev y profundidad de corte de 7 mm, existe una temperatura en la zona primaria de 183 °C la cual disminuye hasta 133 °C en la interfase y para 300 rev/min; 0,35 mm/rev de avance y 5 mm de profundidad de corte, la temperatura es de 190 °C y disminuye hasta 151 °C en la interfase, lo que permite plantear que en la medida que se incrementan los parámetros de corte, existe incremento de la temperatura. Se realizó un análisis de regresión simple de la temperatura vs número de revoluciones y de la temperatura vs profundidad de corte, existiendo posible correlación serial en estas variables. Por último se realiza la valoración económica, la cual incurre en un costo total de 145,32 CUP.



ABSTRACT

The objective of this work is to establish the effect of temperature on AISI 1045 steel during orthogonal cutting without the use of cutting refrigerants. To determine the temperature distribution in this steel, a T 15 K 6 type blade was selected, with main position angle of 45 °. Different cutting parameters were used as: revolutions from 54 to 300 rev / min, advances from 0,25 to 0,43 mm / rev and depth of cut of 5 and 7 millimeters, which influence the heat flow in the interfaces tool - material and tool - part. It was determined that the variation in temperatures fluctuate in the primary and secondary zone of cut between 160 and 195 °C, which can affect the useful life of the tool. At 54 rev / min, advance of 0,25 mm / rev and depth of cut of 7 mm, there is a temperature in the primary zone of 183 °C which decreases to 133 °C at the interface and to 300 rev / min; 0,35 mm / rev of advance and 5 mm of depth of cut, the temperature is of 190 °C and decreases until 151 °C in the interface, what allows to raise that as the increase of the parameters of cut, there is increase of temperature. A simple regression analysis of the temperature v/s number of revolutions and the temperature v/s depth of cut was made, with possible serial correlation in these variables. Finally, the economic valuation, which incurs in a total cost of 145,32 CUP.



TABLA DE CONTENIDOS	Pág.
INTRODUCCIÓN	I
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	4
1.1 Introducción	4
1.2. Generalidades del acero AISI 1045	4
1.3. Procesos de mecanizado	5
1.3.1. Proceso de corte en el mecanizado	7
1.3.2. Distribución zonal de la temperatura en el proceso de corte	10
1.4. Consideraciones generales para la modelización del proceso	13
1.4.1. Simulación de los procesos de mecanizado por elementos finitos	15
1.4.2. Modelos de deformación de material	18
1.5. Conclusiones del capítulo	20
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	21
2.1 Introducción	21
2.2. Composición química del acero AISI 1045	21
2.3. Modelo del corte ortogonal para la distribución de temperatura	22
2.3.1. Planificación experimental para la obtención de las virutas	22
2.3.2. Número de revoluciones por minutos del husillo	23
2.3.3. Avance de la herramienta	23
2.3.4. Profundidad de corte	23
2.4. Preparación experimental	24
2.4.1. Instrumentación utilizada para la medición de las temperaturas	25
2.4.2. Características del torno C 11 MT	27
2.5. Cálculo de los regímenes de corte para el torneado	28
2.6. Cálculo de la velocidad de corte	28
2.6.1. Operación de refrentado	28



2.6.2. Tiempo de maquinado de las probetas	29
2.7. Modelación del proceso de corte ortogonal por elementos finitos	30
2.7.1. Simulación del proceso de corte	31
2.8. Conclusiones del capítulo	37
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	38
3.1. Introducción	38
3.2. Análisis de los regímenes de elaboración	38
3.3. Análisis del tiempo de vida útil de la herramienta	40
3.4. Análisis de la distribución de la temperatura y flujo de calor	41
3.5. Análisis estadístico	50
3.5.1. Análisis de regresión del número de revoluciones vs temperatura	50
3.5.2. Análisis de regresión de la profundidad de corte vs temperatura	52
3.6. Valoración económica	54
3.7. Valoración del impacto ambiental	55
3.7.1. Incidencia ambiental de la tecnología	56
3.8. Conclusiones del capítulo	57



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los procesos de fabricación mediante el mecanizado de piezas constituyen uno de los procedimientos más comunes en la industria para la obtención de elementos y estructuras con diversidad de formas, materiales y geometrías con elevado nivel de precisión y calidad.

El diseño, ingeniería y manufactura asistidos por computadora y las técnicas de planificación de procesos, empleando grandes programas de computadora, se han hecho indispensables para aquellos que llevan a cabo dichos análisis. Los nuevos desarrollos incluyen sistemas expertos, que tienen capacidades de optimización y por lo tanto pueden acelerar el proceso iterativo tradicional de la optimización del diseño.

Tanto para empresas grandes como pequeñas, el diseño del producto conlleva, a menudo, la preparación de modelos analíticos y físicos del mismo, como ayuda para estudiar factores tales como las fuerzas, los esfuerzos, las deflexiones y la forma óptima de la pieza. La necesidad de estos modelos depende de la complejidad del producto. Hoy en día, el estudio de modelos analíticos se ha simplificado mediante el uso del diseño asistido por computadora (CAD) y de ingeniería y manufactura asistida por computadora (CAE y CAM, respectivamente).

El CAD permite conceptualizar objetos con mayor facilidad, sin tener que elaborar ilustraciones, modelos o prototipos costosos. Usando la CAE se puede simular, analizar y probar con mayor precisión y más rápido el desempeño de estructuras sujetas a cargas estáticas o fluctuantes y a temperaturas variables. Por último, la CAM involucra todas las fases de la manufactura, al utilizar y procesar aún más la gran cantidad de información sobre materiales y procesos recolectados y almacenados en la base de datos de la organización.

Posteriormente a la utilización de estas técnicas asistidas por computadora, suele ser necesario fabricar un prototipo, un modelo original del producto que funcione. Un desarrollo reciente importante es el llamado prototipado rápido, que se apoya en técnicas asistidas por computadora y en diversas técnicas de manufactura con el uso de materiales tanto metálicos como no metálicos para producir prototipos de manera rápida, en forma de un modelo sólido y de bajo costo de una determinada pieza física.



Las pruebas de prototipos deben ser diseñadas para simular, de forma tan real como sea posible, las condiciones bajo las cuales se va a usar el producto. Estas condiciones incluyen los factores ambientales como temperatura y humedad y los efectos de la vibración y el uso (y el mal uso) repetido del producto. Las técnicas de ingeniería asistida por computadora son capaces de llevar a cabo estas simulaciones de manera rápida y completa.

La **situación problemática** de la investigación la constituye: una de las técnicas más empleadas para la medición experimental de la temperatura de corte ortogonal es a través del método de los elementos finitos (MEF). El corte de metales es un proceso termomecánico, durante el cual, la generación de calor ocurre como resultado de la deformación plástica y la fricción a través de las interfases herramienta - viruta y herramienta - material de trabajo. La predicción de la temperatura de corte para el proceso de mecanizado es de reconocida importancia debido a sus efectos en el desgaste de la herramienta y su influencia sobre la productividad, el costo de la herramienta y el acabado superficial de la pieza mecanizada.

Por otra parte, el costo del mecanizado se encuentra altamente relacionado con el porcentaje de metal removido y este costo se puede reducir mediante el incremento de los parámetros de corte los que a su vez, son limitados por la temperatura de corte. La energía consumida en el corte de metales es en gran parte convertida en calor en las zonas cercanas al filo de corte de la herramienta. Directa o indirectamente, muchos de los problemas económicos y técnicos en el mecanizado son causados por esta acción de calentamiento.

El **problema** a investigar lo constituye: el estudio relacionado con el efecto de la temperatura en el acero AISI 1045 durante el maquinado por corte ortogonal determinado a través de la simulación por el método de los elementos finitos.

Como **objeto de la investigación** se establece: acero de medio contenido de carbono AISI 1045 sometida a proceso de maquinado por corte ortogonal.

El **campo de acción:** simulación por el métodos de los elementos finitos (MEF) del efecto de la temperatura en la interfases herramienta - viruta - material durante el maquinado por corte ortogonal del acero AISI 1045.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis:** con regímenes de elaboración empleadas en un proceso de torneado como: la frecuencia de rotación del



husillo, la profundidad de corte y el avance, se podrá determinar a través del MEF, la distribución de temperatura que se genera en el mecanizado del acero AISI 1045 durante el arranque de virutas por corte ortogonal.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo** del trabajo: determinar el efecto y la distribución de temperaturas que se generan en el mecanizado del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal a través del método de los elementos finitos (MEF).

Y se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Establecer los procedimientos relacionados con el análisis de la simulación por el método de los elementos finitos (MEF) de los procesos de maquinado por arranque de virutas durante el corte ortogonal.
2. Relacionar el procedimiento metodológico para determinar el efecto y la distribución de la temperatura a través del método de los elementos finitos (MEF) el proceso de mecanizado del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal.
3. Fundamentar a partir de los parámetros establecidos como: la frecuencia de rotación del husillo, la profundidad de corte y el avance, el efecto y la distribución de temperatura que se genera en el mecanizado del acero AISI 1045 durante el arranque de virutas por corte ortogonal.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto se plantean las **tareas de trabajo** siguientes:

1. Establecimiento del estado del arte relacionada con el objeto de estudio.
2. Planificación y realización de experimentos.
3. Análisis de los resultados y obtención de las temperaturas que se originan durante el mecanizado del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal.
4. Fundamentación de las variaciones que se originan en la herramienta cortante por efecto y variaciones de las temperaturas durante el corte ortogonal del acero AISI 1045.
5. Planteamiento de los efectos económicos, sociales y ambientales derivados de los procesos de maquinados.

CAPÍTULO 1

Marco teórico de la investigación



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1 Introducción

La principal motivación de este estudio es el amplio uso del mecanizado en la industria actual y la necesidad de optimizar este proceso. Consecuentemente, la posibilidad de obtener un modelo de elementos finitos con resultados fiables para la predicción de diferentes procesos es fundamental para la mejora de la etapa de experimentación, que consume tiempo y costos. Poder conocer datos sobre temperatura y fuerzas de corte antes de realizar el proceso real, resultara muy útil para predecir el comportamiento de los materiales, tanto de la pieza a mecanizar como de la herramienta.

El presente capítulo tiene como objetivo establecer el procedimiento relacionado con el análisis de la simulación por el método de los elementos finitos el proceso de maquinado del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal.

1.2. Generalidades del acero AISI 1045

Se llaman aceros de construcción a aquellos que se emplean para la fabricación de elementos de máquinas, estructuras y construcciones. El contenido de carbono en este grupo de aceros comúnmente se encuentra entre el 0,5 y el 0,6 %. El acero de construcción debe poseer alta resistencia, plasticidad y viscosidad en combinación con excelentes propiedades de ingeniería. El acero debe elaborarse fácilmente por presión (laminado, forjado, estampado) y por corte y baja tendencia a las deformaciones y formaciones de grietas durante el temple (Lajtin, 1985, Sabinet, 2005).

El empleo industrial de este material en nuestro país es muy difundido, porque tiene amplia aplicación, el mismo presenta, una fácil maquinabilidad, es un acero muy dúctil, forjable y alcanza valores de dureza entre 42 y 48 HRC, cuando se somete a proceso de temple, es un acero de medio contenido de carbono, su producción es nacional el cual requiere de un valor mínimo de costo de producción. Por consiguiente, este es un material adecuado para ejes, pasadores, tornillos (Bengton, 1991).

Los equipos y maquinarias empleados en la industria cubana, MINBAS, MINAZ, CIMEX, MICONS, utilizan para la construcción de gran parte de sus agregados y accesorios el acero AISI 1045, teniendo en cuenta las propiedades que este posee de

incrementar su dureza al ser sometido a tratamiento térmico. El acero AISI 1045 es considerado en la práctica industrial como el material que combina elevada tenacidad - ductilidad con una gran capacidad de endurecimiento por deformación y una elevada resistencia al desgaste a pesar de su relativa baja dureza (Fernández, 2011).

De acuerdo con los criterios de Caubet (1971); Guliaev (1983) y Fernández *et al.* (2017), el acero AISI-1045 en las condiciones de rozamiento, acompañado de grandes presiones, tiene una gran resistencia al desgaste. Este acero se utiliza fundido con menos frecuencia, permite una deformación fácil en frío, y posee la alta tenacidad y plasticidad típica de los aceros, al mismo tiempo que ofrece una buena resistencia al desgaste, esto se debe a que el proceso de endurecimiento va acompañado de la deformación plástica del metal, trayendo consigo un incremento en la fatiga residual compresiva interna y a un considerable aumento en la dureza de la superficie.

El acero AISI 1045 puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas de maquinarias, ya que es un material con facilidad de conformar su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación (Várela, 2003).

1.3. Procesos de mecanizado

Según Coromant Sandvik (2003), los procesos de mecanizado (figura 1.1) constituyen en la actualidad el conjunto de procesos de fabricación más difundidos en la industria. Esto se debe, entre otras razones, a su gran versatilidad en la obtención de geometrías y al nivel de precisión dimensional obtenido en comparación con otros procesos.

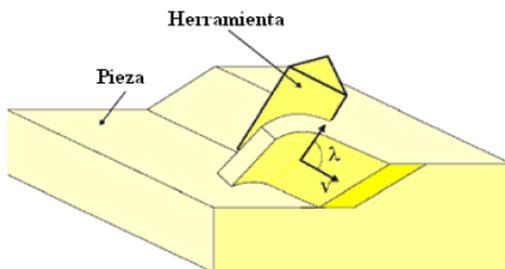


Figura 2.1 Proceso de mecanizado. Fuente: Micheletti (1986).

El mecanizado es uno de los procesos de fabricación más utilizado en la actualidad, especialmente en campos como el automovilístico o el aeronáutico. Por este motivo el estudio sobre estos procesos de eliminación de materiales está en auge en la industria actual (Kalpakjian *et al.*, 2002).

Dada la naturaleza amplia de la ciencia del corte de los metales, un estudio sobre este tema puede ser abordado desde muchas perspectivas, como el material de la pieza a fabricar, las características de la herramienta, la temperatura y la fuerza en la zona de corte, la velocidad de corte, la cantidad y el tipo de viruta generada, la rugosidad obtenida, o bien la combinación de todos ellos (Bäker, 2002).

El contacto entre la herramienta y la viruta (figura 1.2) es un aspecto clave para la comprensión del proceso de mecanizado. La fricción ha sido un tema investigado y discutido. Las fuerzas de corte y de avance no permiten obtener conclusiones acerca de la interacción local en la interfase. La obtención de las tensiones normales y de fricción proporciona este tipo de información.

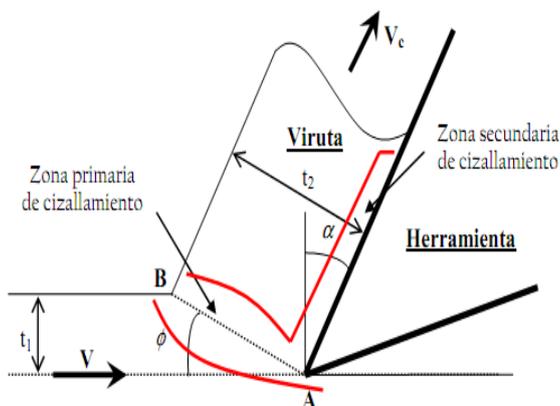


Figura 1.2. Contacto entre la herramienta y la viruta. Fuente: Calamaz *et al.* (2008).

Takeyama y Usui (1958); Ginjaume y Torre (2005) realizan un estudio sobre la variación de las fuerzas de corte con respecto a la superficie de contacto. Para esto, los autores utilizaron una herramienta diseñada para mantener la superficie de contacto constante. La principal conclusión de este trabajo era que la fuerza de fricción es proporcional a la superficie de contacto, es decir, la tensión de fricción media en la interfase es constante. Además, los autores demostraron que esta tensión de fricción media es casi igual al límite elástico de cizalladura del material.

Kattwinkel (1957); Andreev (1958) y Usui y Takeyama (1960) fueron de los primeros en observar experimentalmente la distribución de las tensiones en la interfase. Para conseguirlo, estos autores utilizaron una herramienta foto-elástica para mecanizar plomo a bajas velocidades de corte (entre 0,02 y 0,08 m/s). El perfil de las tensiones obtenido por Kattwinkel e Andreev es muy similar. La tensión normal disminuía fuertemente hasta el final del contacto siguiendo una ley de tipo potencia.

Los resultados de Philippon *et al.* (2004) tienen la particularidad de estar relacionados únicamente con el tipo de contacto deslizante. Así pues, uno puede observar, a partir de estos resultados, que existen dos tendencias para describir la variación de la fricción con la velocidad de deslizamiento relativa entre dos superficies a presión constante:

- ✚ A bajas velocidades de deslizamiento (hasta unos 3 m/s), el coeficiente de fricción obtenido aumenta fuertemente con la velocidad.
- ✚ A altas velocidades de deslizamiento (a partir de 3 m/s), la fricción obtenida disminuye con el aumento de la velocidad aunque también se observa que para bajas presiones aplicadas entre las dos superficies, la fricción tiende a aumentar ligeramente a partir de altas velocidades de deslizamiento (30 m/s).

Molinari y Moufki (2008) propusieron un modelo modificado que mejora la definición de la cinemática del problema. Los autores incluyen un criterio de estabilidad suplementario para la morfología de la viruta. Concretamente, este nuevo modelo, toma en cuenta una forma suavizada de la superficie libre en la base de la viruta. 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) y de Oxley (1989). El modelo desarrollado después por Kudo (1965) y luego también por Dewhurst (1978) sobre la mejoría de la predicción de la curvatura de la viruta, se centra en el estudio de la formación de la misma a través de un análisis de la respuesta de tipo plástico del material.

1.3.1. Proceso de corte en el mecanizado

La relación de corte es un parámetro útil e importante para evaluar las condiciones del corte, ya que el espesor de la viruta no deformada es un ajuste de la máquina y en consecuencia es conocido (variable independiente). La relación de corte se puede

calcular con facilidad midiendo con un micrómetro de tornillo o de caratula el espesor de la viruta.

Como también se conoce el ángulo de ataque para determinada operación de corte, la ecuación permite calcular el ángulo del plano cortante en el corte ortogonal. Si se analiza el modelo de corte ortogonal en exámenes microscópicos se ha visto que las virutas se producen por el proceso de cizallamiento, acción que se produce a lo largo de la zona de cizallamiento, una zona muy pequeña en la que se concentra la deformación (Oxley, 1989).

Bajo el plano cortante, la pieza esta sin deformar mientras que por encima de el se encuentra la viruta ya formada, moviéndose cuesta arriba de la cara de la herramienta al avanzar el corte (Kalpakjian *et al.*, 2002).

El ángulo formado por la dirección de la velocidad resultante de corte y la arista de corte se llama ángulo de inclinación (λ) (figura 1.3a). Cuando $\lambda = 90^\circ$ el modelo de corte se conoce como corte ortogonal, mientras que para valor de λ distinto de 90° el modelo de corte se denomina corte oblicuo (figura 1.3b). En general, los procesos de mecanizado siguen el modelo de corte oblicuo, aunque en la practica es frecuente considerar el modelo de corte ortogonal por su mayor sencillez de cálculo y porque el ángulo de inclinación se aproxima bastante al valor de corte ortogonal.

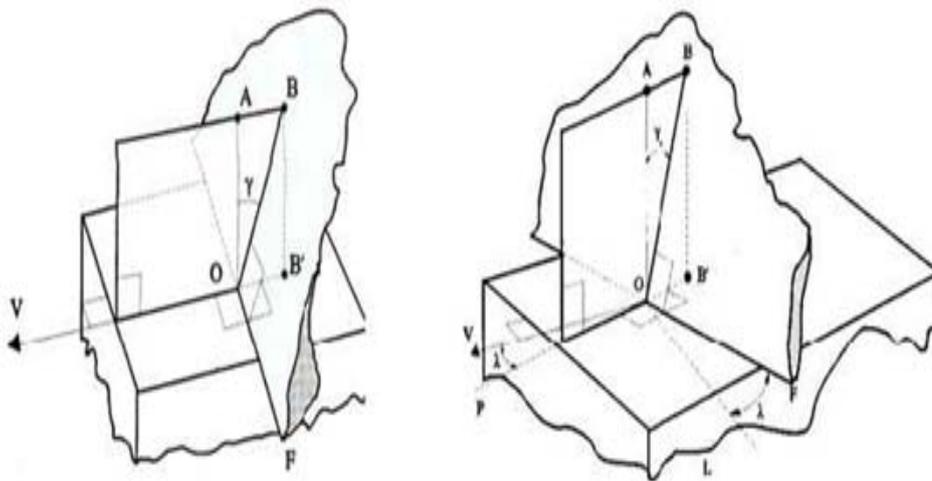


Figura 1.3. Planos asociados al corte: a) corte ortogonal. b) corte oblicuo.

Fuente: Kalpakjian *et al.* (2002).



El ángulo del plano cortante tiene una gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte; influye sobre los requisitos de fuerza y de potencia, sobre el espesor y la temperatura de la viruta (debido al trabajo de deformación). En consecuencia, se ha dado mucha importancia a determinar las relaciones entre el ángulo del plano cortante y las propiedades del material de la pieza y las variables del proceso de corte.

El empleo de ángulos de desprendimiento negativos incrementa el rozamiento viruta-herramienta y produce un incremento del consumo de potencia al requerirse una mayor energía de deformación de la viruta que en el caso de γ positivo, con el consiguiente calentamiento. No obstante, suele emplearse este tipo de geometría cuando se requiere una herramienta con mayor ángulo de filo o cuando se han de mecanizar materiales duros.

La modelación de la fuerza de corte, desde el punto de vista teórico, se ha basado en los modelos de Merchant (1945) y de Lee y Shaffer (1951) y en la teoría del campo de líneas de desplazamiento de Oxley (1989).

Se abren dos vertientes a la hora de estudiar la zona de corte o cizalladura. Autores como Merchant (1945), Piispanen (1937), Kobayashi *et al.* (1959), Dewhurst (1978) se han proyectado por un modelo de zona de corte fina. Sin embargo Palmer *et al.* (1959) o Hitomi y Okushima (1961) prefieren una zona gruesa.

Según datos experimentales, se ha demostrado que el modelo de zona gruesa describe el proceso de corte a bajas velocidades. Sin embargo al variar hasta altas velocidades, el modelo de zona fina parece más fiable. Por esta razón, es más aconsejable el uso de la zona fina, ya que se aproxima más a las condiciones reales de los procesos de corte actuales (Bill, 2003). Además, el modelo de zona fina es más simple que el modelo grueso.

Por estas dos razones su uso está mucho más extendido. El ángulo de corte es la medida de la deformación plástica en el corte y por lo tanto una medida esencial para predecir las fuerzas de corte. Por este motivo, numerosos investigadores han tratado de definir una relación del ángulo de corte que pueda ayudar a calcular las fuerzas de corte. Aunque cada autor tiene una ecuación diferente para describir esta relación.

1.3.2. Distribución zonal de la temperatura en el proceso de corte

De acuerdo con Groover (1997), la energía mecánica puesta en juego en los procesos de corte puede descomponerse en los términos siguientes:

- ✚ Energía de deformación elástica,
- ✚ Energía de deformación plástica,
- ✚ Energía de rozamiento.

De estas energías, la primera es almacenada por el material y no genera calor, mientras que las otras dos son de carácter disipativo, ya que las deformaciones plásticas producen rozamientos internos y originan la transformación de la energía mecánica en calorífica.

Según Trent (2000), es importante conocer el aumento de temperatura por los fenómenos siguientes:

- ✚ Una temperatura excesiva afecta negativamente la resistencia, dureza y desgaste de la herramienta de corte.
- ✚ Al aumentar el calor se provocan cambios dimensionales en la parte que se maquina y dificulta el control dimensional.
- ✚ El calor puede inducir daños térmicos en la superficie mecanizada que afectan negativamente sus propiedades.
- ✚ La misma máquina herramienta se puede exponer a temperaturas elevadas y variables causando su distorsión y, en consecuencia, mal control dimensional de la pieza.

En lo que respecta al fenómeno de generación de calor se pueden considerar tres zonas diferentes que se pueden observar en la figura 1.4, en las que se alcanza un mayor incremento de temperatura.

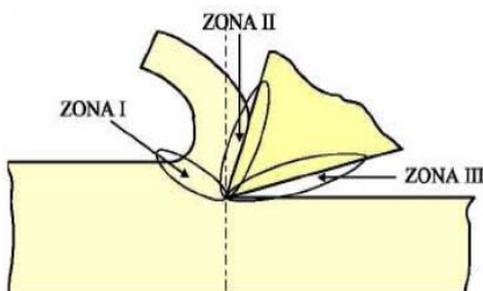


Figura 1.4. Zonas térmicas en el corte. Fuente: AMS Handbook (1995).

La primera de ellas (zona I) engloba el plano o la zona de deslizamiento, que es aquella en la que se produce un rozamiento interno del material de la pieza que esta siendo deformado.

La segunda zona (zona II) se localiza en la cara de desprendimiento de la herramienta y aparece como consecuencia del rozamiento entre esta y la viruta.

Boothroyd (2002) señaló que la distribución de calor (figura 1.5) varía de forma lineal a lo largo de la cara de contacto herramienta-viruta partiendo de un valor proporcional a la relación velocidad de la viruta y el máximo espesor de esta.

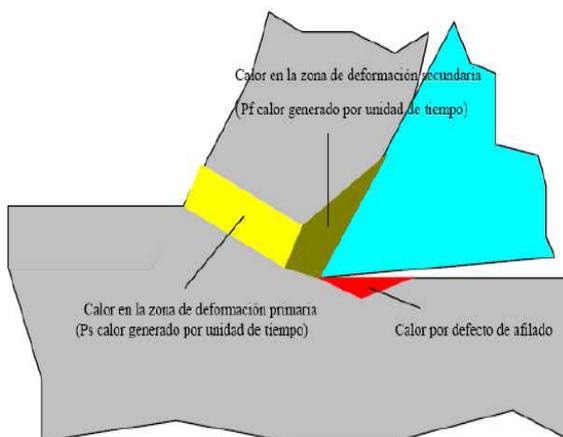


Figura 1.5. Calor producido en las diferentes zonas térmicas.

Fuente Kalpakjian *et al.*, (2002).

La fuente de calor que si es tomada en cuenta a lo largo de esta zona es la propiciada por la fricción entre material y herramienta y el valor de la energía por unidad de tiempo (potencia) que se genera por este concepto viene dado por el producto de la fuerza de fricción y la velocidad de la viruta.

Finalmente aparece una tercera zona (zona III) en las inmediaciones de la cara de incidencia de la herramienta debida al rozamiento aparecido entre esta y la superficie ya mecanizada de la pieza.

El calor generado en las zonas I y III afecta fundamentalmente a la pieza y presenta mayores posibilidades de evacuación del mismo por conducción hacia el interior y por convección hacia el ambiente exterior (Kalpakjian *et al.*, 2002).

La zona más crítica es la zona II puesto que, aunque el calor generado se distribuya entre la viruta y la herramienta, la parte correspondiente a la herramienta resulta más difícil de eliminar y va acumulándose a medida que se desarrolla el proceso.

La distribución particular de temperaturas como se muestra en la figura 1.6, dependerá de factores como el calor específico y la conductividad térmica de los materiales de la herramienta y de la pieza, la velocidad de corte, profundidad de corte y la clase de fluido de corte que se usa.

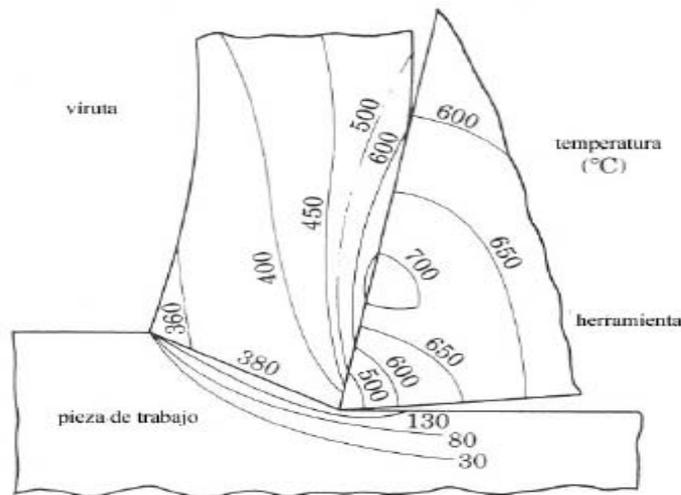


Figura 1.6. Distribución típica de temperaturas en la zona de corte.

Fuente: Kalpakjian *et al.*, (2002).

Un efecto nocivo derivado del incremento de temperatura es el conocido como “filo recocado”, cuya aparición depende además de los materiales de la pieza y de la herramienta. El filo recocado consiste en la deposición progresiva de material de la pieza sobre la cara de desprendimiento de la herramienta. Este material queda adherido por soldadura y modifica la geometría de la herramienta de forma tal que se hace necesario detener el proceso y proceder a la eliminación del recocimiento antes de proseguir (Groover, 1997).

Plantea Kalpakjian *et al.* (2002) que el 80 % de la temperatura lo absorbe la viruta, un 10 % es absorbido por la pieza de trabajo y el otro 10 % lo absorbe la herramienta de corte. Para disminuir el incremento de temperatura de la herramienta durante el proceso de mecanizado se utilizan los denominados fluidos de corte. Estos actúan, bien mediante

una disminución del coeficiente de rozamiento (lubricación), bien permitiendo una mayor posibilidad de evacuación del calor generado (refrigeración).

Ambos efectos, lubricación y refrigeración, suelen actuar simultáneamente. Según predomine uno u otro puede establecerse una subdivisión entre los fluidos de corte. Aquellos fluidos de corte en los que predomina el efecto de lubricación están constituidos mayoritariamente por aceites minerales y suelen emplearse en procesos con velocidades de corte relativamente bajas (escariado, brochado). En los que predomina la refrigeración (taladrinas) su constitución mayoritaria es agua con la adición de aceites minerales solubles bien disueltos o bien en emulsión.

En cuanto a estudios analíticos sobre la temperatura, resaltar la aportación de Hahn (1951) que desarrolló un modelo para la temperatura en el estado estacionario que ha sido mejorado por Komanduri *et al.* (2001) y también es destacable el estudio de la interacción entre pieza y herramienta realizado por Chao *et al.* (1953), encontrando un modelo analítico para la distribución de la temperatura en la zona de contacto de ambas que también fue mejorado posteriormente por Komanduri *et al.* (2001)

1.4. Consideraciones generales para la modelización del proceso

El método de los elementos finitos tiene su origen en los años cincuenta, cuando ingenieros adaptan el análisis variacional aplicado a los medios continuos a las estructuras discretizadas con elementos. Sin embargo, pronto se dieron cuenta de la potencialidad de este método en aplicaciones muy variadas: análisis térmico, estudio de dinámica de fluidos, campos electromagnéticos (Bathe, 1996 y Thomée, 1997).

En la actualidad, el método de la simulación ha sido muy generalizado y constituye una potente herramienta de cálculo numérico capaz de resolver cualquier problema formulable de la matemática, la física y la mecánica; permitiendo simular y realizar una gran cantidad de análisis en componentes y estructuras complejas, difícilmente calculables por los métodos analíticos tradicionales.

Con la simulación se puede obtener la resolución numérica de las ecuaciones matemáticas que describen el fenómeno estudiado con el uso de un ordenador. Por lo tanto, se puede asumir que la simulación es tan exacta como tantas sean las ecuaciones



de partida y la capacidad de los ordenadores para resolverlas, lo cual fija límites a su utilización Ingham y Moreland (1983).

Plantea Alfaro (2001), que un programa de simulación es una pieza compleja de software en la que confluyen numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en subsecciones, cada una de las cuales efectúan una operación determinada. Sin embargo, el tema no se limita al puro cálculo. La preparación de los datos y el análisis de los resultados numéricos que aparecen como producto del cálculo, son elementos que están integrados al software.

Un paquete de cálculo de simulación consta de un procesador, en el cual se incluyen todas las ayudas a la preparación de los datos y que generan los archivos de resultados y un postprocesados que facilita el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma de gráfica mediante trazado de curvas, gráficos tridimensionales y tablas.

En su trabajo Huang y Usmani (1994), describen un método de los elementos finitos componiendo una compilación de tres procesos: la fórmula variacional de Rayleigh-Ritz, el recubrimiento del entorno de integración con intervalos compactos e interconectados por los nodos y la aplicación del algoritmo de residuos ponderados

En el caso específico del análisis tenso - deformacional de elementos sometidos a la acción de cargas dinámicas, el método permite la determinación de los componentes y la determinación del estado deformacional en ciertos puntos característicos. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del objeto de estudio y localizar zonas altamente solicitadas o zonas de baja sollicitación.

Por otro lado en la modelización del proceso de maquinado, Cheriguene (2009) se centra en los aspectos termomecánicos de la formación de la viruta, para simplificar la problemática, analiza la configuración más sencilla del mecanizado: el corte ortogonal donde el ángulo de corte y 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.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) consiste en la discretización de un problema continuo inicial. Cuanto más fina es la discretización aplicada, mejor aproximación del problema continuo se obtiene. En el caso de la modelización del proceso de corte



ortogonal la geometría y la velocidad de corte son datos conocidos, y es preciso definir los siguientes aspectos:

- ✚ Material de la pieza y material de la herramienta.
- ✚ Interacción entre la pieza y la herramienta.
- ✚ Condiciones de contorno para la pieza y para la herramienta.
- ✚ Método de integración (Implícito o explícito).
- ✚ Formulación del problema (Lagrangiano, Euleriano o ALE).
- ✚ Mallado (talla, forma y tipo).

Es un hecho conocido que los resultados numéricos pueden ser dependientes de los parámetros numéricos implementados. Lo ideal sería controlar la influencia en los resultados de todos y cada uno de los parámetros numéricos. Sin embargo, la influencia cruzada entre los parámetros durante una simulación hace muy difícil desacoplar las distintas contribuciones.

1.4.1. Simulación de los procesos de mecanizado por elementos finitos

Para resolver un problema mediante elementos finitos, se utilizan principalmente dos métodos de cálculo distintos para obtener las soluciones a las ecuaciones, explícito e implícito (Camacho, 2005).

Mediante el método implícito se trata de resolver sistemas de ecuaciones de manera iterativa, de manera que la convergencia en el paso anterior es necesaria para la continuidad de la resolución. El método explícito, sin embargo, no necesita de esa convergencia al no usar iteraciones.

Una desventaja del método explícito es que el tiempo de paso es restringido. Por este motivo, cuando se tiene un proceso sencillo con fácil convergencia es preferible utilizar el método explícito, sin embargo es preferible el método implícito para sistemas complejos con numerosas condiciones de contacto (Astrom, 2004).

Muchos han sido los autores que han discutido sobre las preferencias sobre un método u otro (Astrom, 2004; Martínez, 2003), siempre con la misma conclusión: dependiendo del problema se debe estudiar el método más apropiado.

En este caso, el código de elementos finitos empleado para resolver los cálculos es de metodología implícita y utiliza una solución iterativa incremental basada en el método de Newton-Raphson, que es uno de los procedimientos comúnmente utilizados para la resolución de este tipo de problemas.

Existen dos tipos de análisis usados para la modelización con MEF (Wince, 2002), que son los análisis mediante formulación Euleriana y mediante formulación Lagrangiana.

En la formulación Euleriana, la red mallada está fijada en el espacio. La ventaja de este método es que es necesario un menor número de elementos, por lo que, se reduce el tiempo del análisis.

Para realizar el análisis mediante la formulación Euleriana se emplean restricciones en el espacio que obligan a la viruta a formar una determinada geometría. Esto permite muy buenos resultados geométricos; por este motivo algunos autores se han decantado por este método (Raczy *et al.*, 2004; Fleischer *et al.*, 2006). En la figura 1.7 se puede observar una muestra de un modelo empleando la formulación Euleriana.

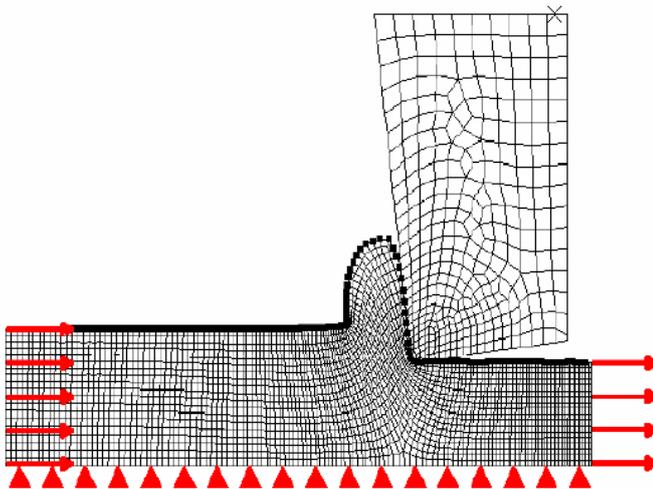


Figura 1.7. Modelo realizado mediante formulación Euleriana. Fuente: Fleischer: (2006).

Por otro lado, este método requiere determinar con anterioridad la geometría del mecanizado y el ángulo de fractura experimentalmente, lo que supone un paso atrás en la simulación. Ejemplos de autores que se decantan por esta son Astrom (2004), Strenkowski y Athavale (1997), Ceretti *et al.* (2000) y Obikawa (1996).

Estos consideran que en la pieza de corte debe haber una zona de tensión desde donde se transmite la fuerza de corte del plano de cizalladura hasta la cara de la herramienta. Esto es representado mediante una zona de deslizamiento en la que no hay deformación aunque se lleve hasta el límite de elasticidad.

La gran mayoría de modelos están basados en la formulación Lagrangiana, donde la red se deforma con el material. Este método requiere instrucciones de remallado, que deben ser especialmente estudiadas si se quieren obtener resultados fiables (figura 1.8). Por este motivo, los códigos de elementos finitos actuales incluyen una versión mejorada ("Updated Lagrangian") que permite un remallado automático o adaptación de malla basado en la penetración de la herramienta y/o en la deformación de los elementos en contacto con la misma.

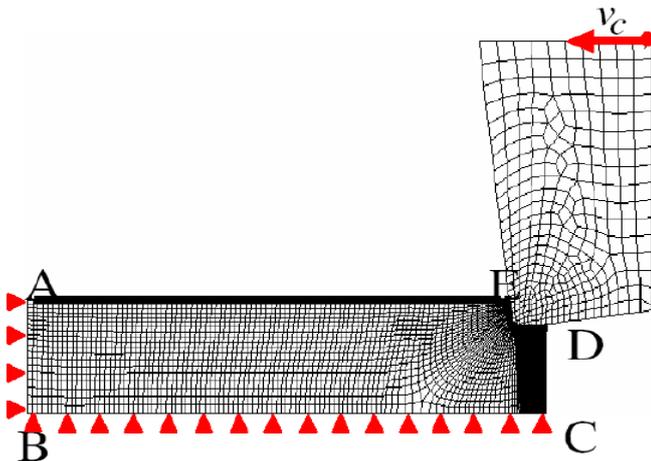


Figura 1.8. Modelo realizado mediante formulación Lagrangiana.

Fuente Fleischer: (2006).

Umbrello *et al.* (2006) advierten de los puntos débiles de esta formulación; las altas tensiones y altos gradientes de temperatura a las que se ven sometidos los materiales en un mecanizado hacen muy difícil el modelar el remallado. Así pues, es necesario un gran número de elementos en el malla/remallado para obtener resultados locales en tiempo y espacio aceptables.

Existe un tercer método que combina las ventajas de ambos análisis Euleriano y Lagrangiano (Miguel *et al.*, 2007). Se trata de la técnica "Arbitrarily Lagrangian-Eulerian (ALE)" Esta técnica es utilizada para evitar las altas frecuencias del remallado

en el análisis Lagrangiano, evitando la necesidad de un criterio de separación de viruta y de definir condiciones de contorno externas para la misma.

1.4.2. Modelos de deformación de material

Investigadores como Oxley (1989), Voringer y Schulze (2000), Joshi y Melkote (2004) y Liu y Melkote (2006) han desarrollado sus propias teorías y modelos de materiales. En concreto, el modelo formulado por Oxley (1989) es el más utilizado en los programas de simulación por el Método de Elementos Finitos.

De acuerdo con Astakhov (2000), el mayor problema en la simulación de corte ortogonal es que la deformación va más allá de la teoría de plasticidad. Debido a las altas tensiones que se producen durante la formación de la viruta, esta teoría no es admisible para la simulación de corte de metales. Por este motivo, la mayoría de los investigadores se proyectan por una teoría mixta. Estas teorías mixtas se dividen en dos tipos diferentes: modelos elástico - plásticos y modelos rígidos - plásticos. La elección entre uno y otro dependerá de si la parte elástica de la deformación juega un papel importante en la simulación o no.

Muchos autores han abogado por el modelo elástico - plástico (Mackerle, 2003) debido a que este método permite la predicción del llamado "efecto muelle" así como de tensiones térmicas y residuales (Astrom, 2004). Sin embargo en la gran mayoría de la literatura los autores se proyectan por un modelo de material de tipo plástico o viscoplástico asimilable a la existencia de un proceso previo de precorte del material (Al-Zkeri, 2007).

Otro factor de deformación a tener en cuenta en los materiales es el índice de plasticidad, indicado mediante la tensión. Un modelo independiente de dicho índice, no tendrá en cuenta la tensión debida a la plasticidad en las ecuaciones usadas para el análisis. En los cortes ortogonales de metales se ha comprobado que el índice de tensión es muy grande, y por lo tanto en la mayor parte de las simulaciones se utiliza un modelo de material dependiente del índice de plasticidad. Sin embargo, dado la dificultad de obtener datos en ensayos reales para determinados materiales, también se encuentran casos en los que se desprecia dicho índice.



Chen *et al.* (2008) y Umbrello (2007) introducen en sus modelos la valoración de la fractura aplicando la ecuación de Cockcroft-Latham, obteniendo los valores de las constantes, tanto del factor crítico de dicha ecuación como el coeficiente de fricción, tras un proceso iterativo.

Por su parte, la modelación de la fuerza de corte, desde el punto de vista teórico, se ha basado en los modelos de Merchant (1945) y de Lee y Shaffer (1951) y en la teoría del campo de líneas de desplazamiento de Oxley (1989).

Se abren dos vertientes a la hora de estudiar la zona de corte o cizalladura. Autores como Merchant (1945), Piispanen (1937), Kobayashi *et al.* (1959), Dewhurst (1978) se han decantado por un modelo de zona de corte fina. Sin embargo Palmer *et al.* (1959) o Hitomi y Okushima (1961) prefieren una zona gruesa.

Aun teniendo en cuenta estos dos fenómenos, la tensión de cizalladura resulta mayor que el límite de fluencia. Diferentes autores han encontrado explicaciones a este hecho.

Merchant (1945) afirma que estos valores de tensión aumentan en el plano de corte debido a los altos valores de tensión normal sobre este plano. Por otro lado, otros autores como Backer *et al.* (1952) y Shaw *et al.* (1955) sugieren que el tamaño del área de deformación puede influir en los valores de tensión de corte.



1.5. Conclusiones del capítulo

- ✚ Se determinó que el acero AISI 1045 es empleado en la construcción de diferentes elementos de máquinas por su posibilidad de ser tratado térmicamente y alcanzar dureza entre 42 y 48 HRC, así como de presentar buena maquinabilidad.
- ✚ El mecanizado es un proceso de elaboración por arranque de virutas donde entra en contacto una herramienta con la superficie de una pieza para obtener la elaboración de un producto con el desprendimiento de una parte de esta.
- ✚ Las características de la herramienta para realizar el maquinado de pieza determina el tipo de corte a emplear (oblicuo u ortogonal) y la distribución de temperaturas durante el proceso puede ser establecida a través del empleo del método de los elementos finitos (MEF).

CAPÍTULO 2

Materiales y Métodos

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

En este capítulo se expondrá el procedimiento metodológico para determinar el efecto y distribución de la temperatura a través del método de los elementos finitos (MEF) el proceso de mecanizado del acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal, también se darán a conocer los modelos para la simulación así como el procedimiento para realizarla, además se efectuará la selección del software para la ejecución del estudio de los modelos de corte.

Objetivo del capítulo

Establecer la ruta metodológica para determinar la distribución de la temperatura y su efecto mediante el método de los elementos finitos (MEF).

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 AISI 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. La facilidad con que es removido el material representa economía en la producción del componente. La adición de azufre en los aceros 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 de acuerdo con Kiessling y Lange (1978).

2.3. Modelo del corte ortogonal para la distribución de temperatura

La interacción térmica entre la herramienta y el conjunto herramienta/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 las temperaturas, como se muestra en la figura 2.1, fue el de corte ortogonal.

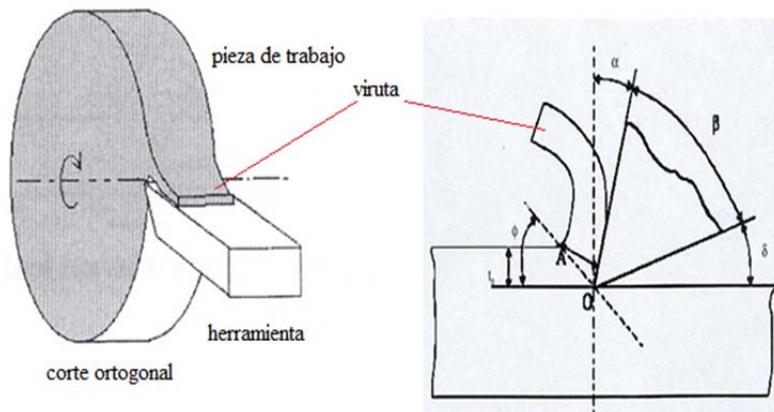


Figura 2.1. Modelo de corte ortogonal.

Las superficies a examinar son el resultado de la operación de cilindrado en el torno para la obtención de las diferentes temperaturas, las cuales son obtenidas a través del corte ortogonal. Se empleó 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 temperaturas

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	
	n_r (rev/min)	t (mm)	S(mm/rev)	Temperatura ° C	
a	54	7	0,25		
b	75	7	0,43		
c	110	5	0,25		
d	300	5	0,35		
Ensayo	Corridas experimentales			Zona1	Zona 2
1	a	a	a	T ₁	T _{1,1}
2	b	b	b	T ₂	T _{2,1}
3	c	c	c	T ₃	T _{3,1}
4	d	d	d	T ₄	T _{4,1}

Para la obtención de las temperaturas 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 las temperaturas en las zonas primarias y secundarias de corte.

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 térmico. 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 térmico durante el 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 0,07 a 0,3 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 temperaturas 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 temperatura, 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 arranque de metal. Otro tanto sucede si se aumenta la profundidad de pasada en un 50 %, con una disminución del 10 % de la velocidad de corte.

2.4. Preparación experimental

Las selecciones de las temperaturas 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 2 zonas de cizallamiento para la medición de las temperaturas, se consideró la geometría de la herramienta de corte.

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 2.2 se muestra el proceso de maquinado para la selección de las temperaturas.



Figura 2.2. 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 T5 K10 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						
		ϱ	ϱ_1	γ	α	α_1	λ	r (mm)
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 la que conserva 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.

2.4.1. Instrumentación utilizada para la medición de las temperaturas

Para la medición de temperatura se empleó un pirómetro digital como se observa en la figura 2.3 y una cámara termográfica, con los cuales se determinaron las temperaturas en las zonas primaria y secundaria de cizallamiento.



Figura 2.3 (a). Pirómetro laser.

El instrumento de medición utilizado fue un pirómetro digital Minolta/ Land/Ciclops, para obtener los valores de temperatura en los procesos de corte por maquinado, en cada una de las probetas con diferentes regímenes de corte.

El pirómetro para altas temperaturas ha sido desarrollado para realizar mediciones en el sector del metal / acero, (especialmente para fundición) aunque también realiza mediciones en múltiples sectores que emplean altas temperaturas. El equipo puede determinar de manera rápida y precisa una temperatura desde $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $+4\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$, además posee un rango de $0,001\text{ mm}$ de precisión. Posee un rendimiento eléctrico que puede grabarse por un registrador del mapa portátil o fijo, su tiempo de contestación es de $0,08$ segundos.

La cámara termográfica se muestra en la figura 2.3 (b).



Figura 2.3 (b). Cámara térmica.

Las pruebas de termografía infrarroja se realizaron con una cámara termográfica marca ThermoCAM PM575, este equipo dispone de sensores infrarrojos que pueden ver las longitudes de onda de la radiación infrarroja de los cuerpos. Posee una sensibilidad térmica del orden de los $50 - 100\text{ mK}$. Los píxeles de la cámara con tiempos de integración de 200 y $400\text{ }\mu\text{s}$.

La principal ventaja de la medida de temperatura mediante termografía infrarroja, es que representa una técnica de medición no intrusiva; es decir, que no se requiere contacto físico entre el objeto analizado y el equipo de medición, por lo que no afectará a las condiciones de funcionamiento y operación de los objetos, equipos o elementos observados. Esta cualidad la hace especialmente apropiada en el control y mantenimiento de elementos energizados; y a la vez, no pone en riesgo al personal que realiza las mediciones.

2.4.2. Características del torno C 11 MT

En la figura 2.4 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 2.4. 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, $P_x = 6\ 000$ MPa.

2.5. 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 máquinas 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.

2.6. 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.

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (2.1)$$

Donde:

V_c - velocidad de corte; m/min.

D - diámetro de la pieza; mm.

n - números de revoluciones; rev/min.

1000 - factor de conversión de metro a milímetros.

Los números de revoluciones que se emplearán son: 54; 75; 110 y 300 rev/min.

2.6.1. 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.

$$T_m = \frac{\frac{D}{2} + Y + \Delta}{n \cdot s} \cdot i \quad (2.2)$$

$$Y = t \cdot \cot \varphi \quad \Delta: 1 \dots 3 \quad (2.3)$$

Donde:

Y - longitud de entrada de la cuchilla; mm

Δ - Coeficiente.

i - números de pasadas.

2.6.2. 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.

$$T_m = \frac{L}{n \cdot S} \cdot i \quad (2.4)$$

Donde:

T_m - 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 V_c 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:

$$VT^n = C \quad (2.5)$$

Donde:

V - 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 - 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 2.4 se establecen los parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

Tabla 2.4. Parámetros para determinar la vida útil de la herramienta.

No	n (rev/min)	t (mm)	S(mm/rev)	T (min)	n	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 2.4 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 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 temperaturas 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 las temperaturas obtenidas durante el proceso de maquinado.

2.7. Modelación del proceso de corte ortogonal por elementos finitos

Se estableció un modelo en 2D para el estudio del proceso de mecanizado por corte ortogonal del acero AISI 1045 como se muestra en la figura 2.5 para determinar la distribución de temperaturas y el flujo de calor. Esta simplificación se corresponde con las características del objeto real.

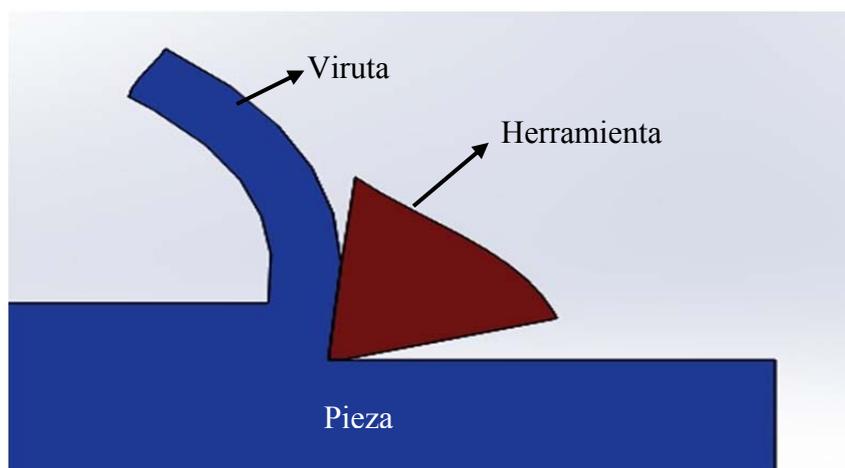


Figura 2.5 Modelo en 2D de corte ortogonal.

La mayoría de las simulaciones se basan en la medición de temperaturas transitorias para aproximar el aporte de calor, debido a que no es posible hasta el momento, dados los parámetros de corte, hallar la distribución de la temperatura y el flujo de calor neto. De esta manera, las temperaturas utilizadas en el modelo de elementos finitos se cambian hasta que lo simulado y lo medido coincide, en otras palabras, se realiza una calibración del modelo.

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, 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.

2.7.1. Simulación del proceso de corte

El cálculo térmico con cualquier software de elementos finitos no es la simulación de un proceso de corte, no se simulan los efectos físicos reales que causan la transferencia de calor en las interfases herramienta-pieza y herramienta-viruta. Lo que se simula son los efectos del calor producidos por el mecanizado.

En la simulación del proceso de mecanizado del acero AISI 1045 por corte ortogonal se dirigió al cálculo de las zonas primarias y secundarias de cizallamiento, donde se consideró todos los efectos físicos de dicha zona.

Para el análisis térmico, se han usado los datos obtenidos experimentalmente para calibrar la fuente de calor de la simulación. Se han considerado dos aspectos en el ajuste del campo de temperatura. Primero, la geometría de la sección transversal del corte (figura 2.5). Segundo, los valores de temperatura correspondientes en la zona de interfase del proceso de mecanizado, dando especial énfasis al pico de temperatura y al pico de flujo de calor en la interfase.

Para la simulación se modelizó las condiciones de contorno térmicas no lineales como la temperatura ambiente en el local donde se realizó la tarea experimental.

El mallado se realizó con elementos sólidos tetraédricos, parabólicos, de 10 nodos, refinándose en la zona aledaña a la interfase, empleando la opción *mesh control* que ofrece la herramienta CAT (SOLIWORK), pues en esta zona es que se colocan los

puntos en los que se va a determinar la temperatura máxima y la historia térmica en general (puntos denominados por el software y situados a 0,01; 0,03; 0,05 y 0,09 cm del centro de las zonas de cizallamiento).

Las figuras 2.6 (a) y 2.6 (b) muestran las condiciones de fronteras y el modelo mallado para número de revoluciones de 54 rev/min, profundidad de corte de 7 mm y un avance de 0,25 mm/rev.

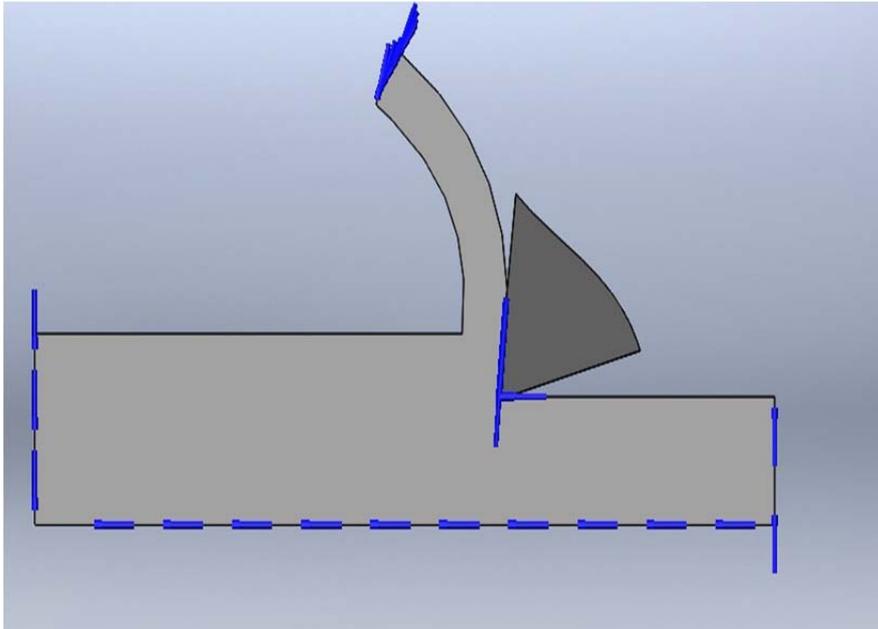


Figura 2.6 (a) Condiciones de frontera

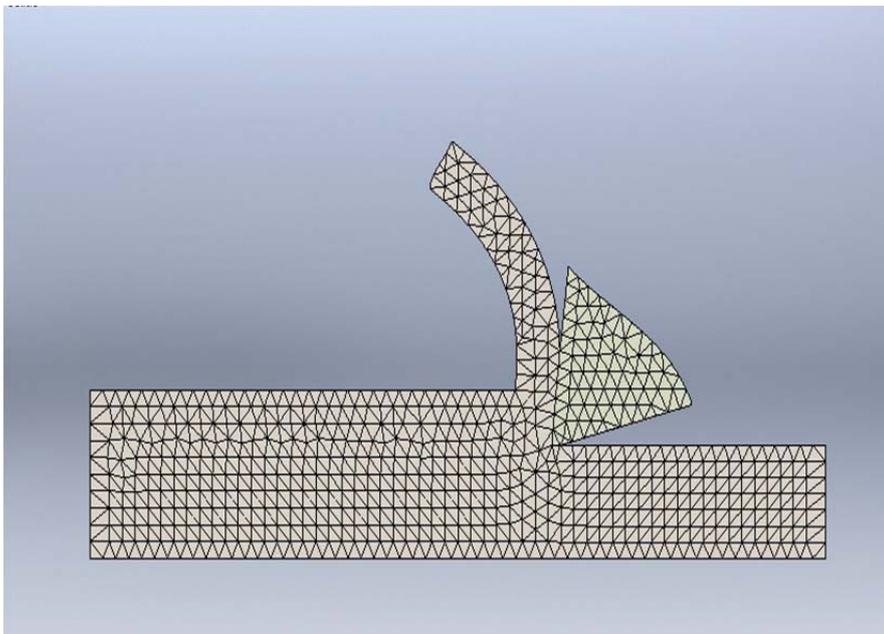


Figura 2.6 (b) Mallado del modelo

Para obtener la distribución de temperatura para estos regímenes de corte en la zona de la interfase se empleó una temperatura de 183 °C en la zona primaria y 170 °C en la secundaria.

En la figura 2.7 (a) y 2.7 (b) se observan las condiciones de fronteras y el mallado del modelo de corte, los cuales son similares puesto que se efectuaron bajo las mismas condiciones ambientales excepto los regímenes de corte los cuales fueron, número de revoluciones $n = 75 \text{ rev/min}$, avance $S = 0,43 \text{ mm/rev}$ y profundidad de corte $t = 7 \text{ mm}$.

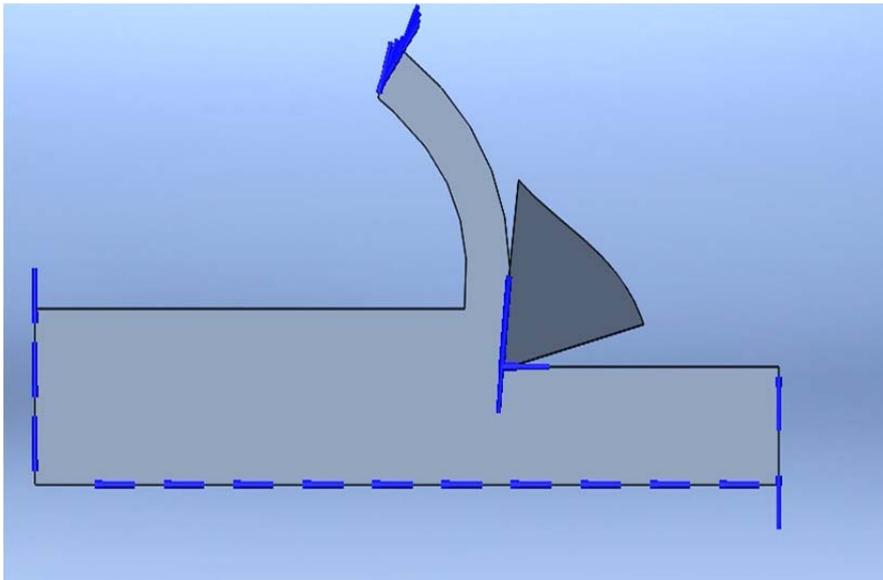


Figura 2.7 (a) Condiciones de frontera.

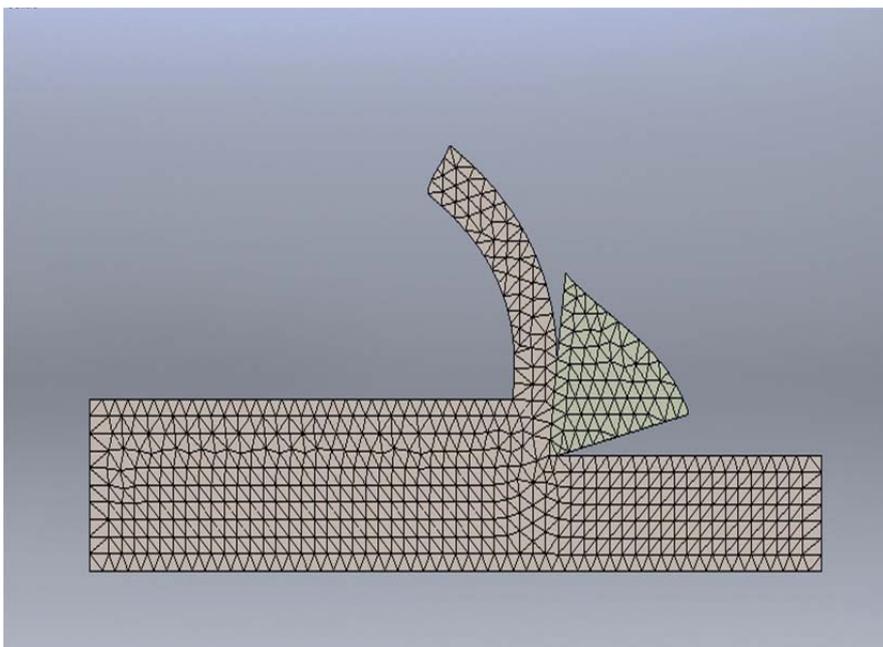


Figura 2.7 (b) mallado del modelo.

En la figura 2.8 (a) y 2.8 (b) se muestran las condiciones de entorno del modelo de corte y el mallado del mismo para regímenes de corte de número de revoluciones $n=100$ rev/min, profundidad de corte $t=5$ mm y avance $S=0,25$ mm/rev. Además de estos el experimento arrojó una temperatura de 186 y 178 °C para las zonas primarias y secundarias de incidencia de la herramienta.

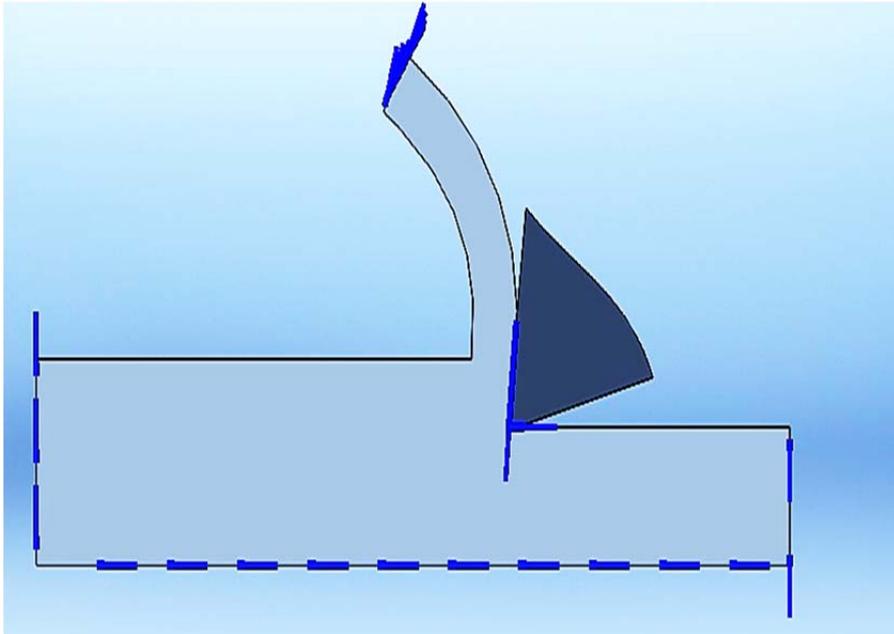


Figura 2.8 (a) Condiciones de frontera

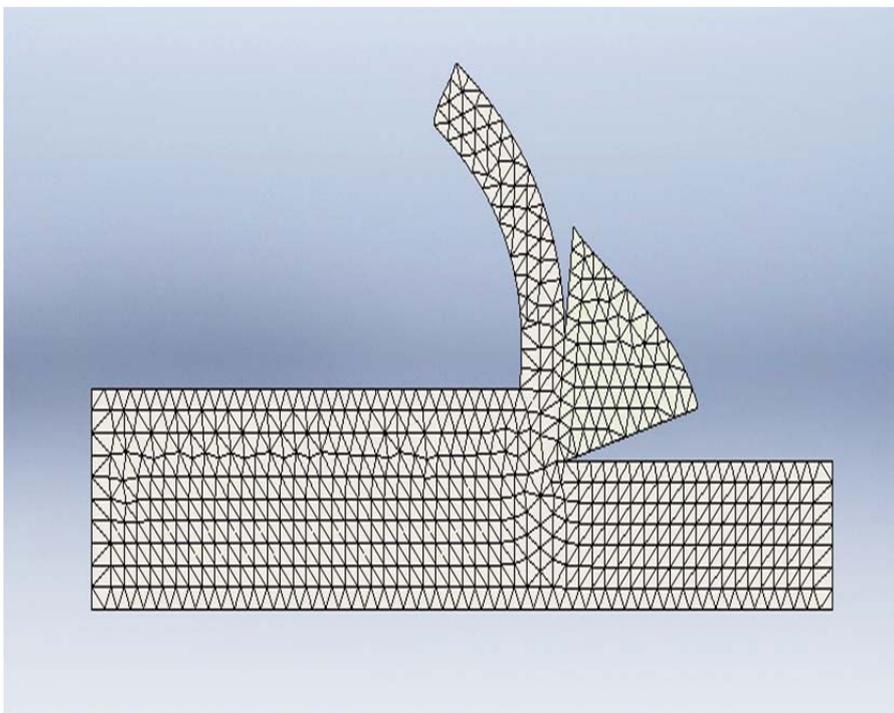


Figura 2.8 (b). Mallado del modelo

En la figura 2.9 (a) y 2.9 (b) se reflejan las condiciones de frontera y el mallado del modelo de corte ortogonal para las condiciones de corte siguientes, número de revoluciones del husillo $n = 300$ rev/min, avance $S = 0,35$ mm/rev y profundidad de corte $t = 5$ mm. Bajo estas condiciones de mecanizado el experimento mostró un registro de una temperatura de 190 y 180 °C para las zonas primarias y secundarias de cizallamiento.

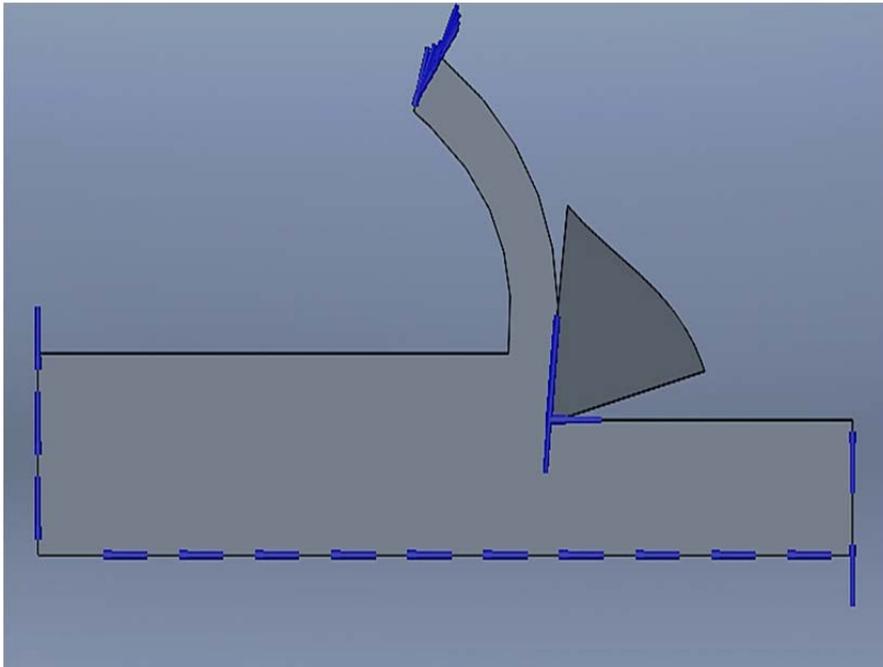


Figura 2.9 (a). Condiciones de frontera

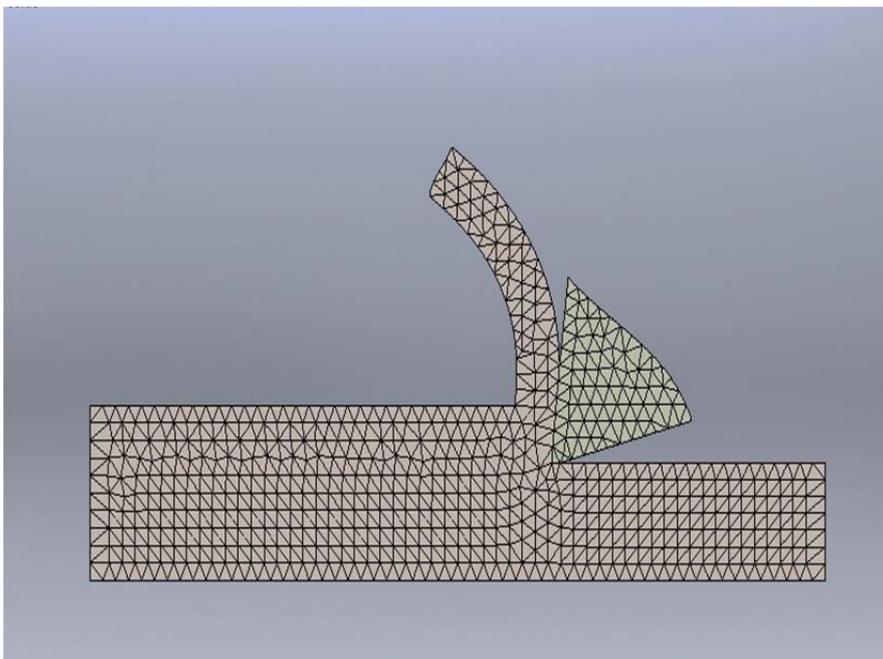


Figura 2.9 (b). Mallado del modelo

La configuración para modelar el corte ortogonal describe un flujo continuo y constante de material a través del mallado definido por la geometría del problema. Esta importante convección de material hace que la interacción térmica de la pieza con el “exterior” sea despreciable una vez alcanzado el régimen estacionario. La herramienta se modeló bajo la formulación lagrangiana con lo que se calentaría indefinidamente si no se le implementa una manera de difundir el calor.

El tamaño característico de los más pequeños elementos utilizados para la discretización de las zonas primarias y secundarias de cizallamiento, ha sido obtenida de tal manera que la zona primaria de deformación pueda contener los elementos en su espesor, con el objetivo de tener una buena resolución, en el estudio, de esta zona caracterizada por fuertes gradientes, en concreto en las velocidades de deformación.

La suma de todos los elementos representa el objeto de estudio, al que se llama cuerpo mallado y establecidos en las diferentes figuras para los diferentes parámetros de corte, permitirá conseguir una gran aproximación con la realidad a la hora de realizar el estudio de los elementos finitos.

En nuestro estudio se considera además que, cada elemento interacciona con sus elementos vecinos mediante una serie de ecuaciones que llevan como variables las incógnitas del problema a estudiar. Estas ecuaciones serán lineales o no dependiendo de las propiedades definidas del material y las condiciones de contorno del problema. Resolviendo cada una de las ecuaciones dentro de los elementos, se obtiene la solución global del problema.

En el pre-procesado se incluye la definición del problema o el concepto y la modelización. Esta es una parte fundamental del trabajo, ya que cuantos más parámetros se definen, más veraces serán los resultados obtenidos, pero a su vez el tiempo de cálculo también se incrementa de manera considerable.

2.8. Conclusiones del capítulo

- Se estableció el procedimiento metodológico para determinar el proceso de maquinado del acero AISI 1045 mediante el modelo de corte ortogonal, para ello se consideró variables como el número de revoluciones, el avance y la profundidad de corte, donde este proceso se realizará en seco.
- Para el método de los elementos finitos se consideró las condiciones de fronteras y el modelo del elemento mallado para cada uno de los parámetros del régimen de corte a emplear, en correspondencia con la temperatura que se genera en la zona primaria y secundaria de cizallamiento.
- A partir de los resultados de las temperaturas obtenidas en el proceso de simulación producido por calor latente se tendrá en cuenta las afectaciones de la variación de los regímenes de corte en el corte ortogonal en seco en la vida útil de la herramienta.

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, 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 la distribución de temperatura que se originan por efecto de este proceso para diferentes regímenes de corte.

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 la distribución de la temperatura y el flujo de calor en las interfases herramienta-material y herramienta-pieza, se procedió a calcular los parámetros de corte ortogonal establecidos en el capítulo 2 epígrafe 2.5. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de corte que permitieron la obtención de las diferentes temperaturas, las ecuaciones que se tuvieron en cuenta fue la 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4.

Tabla 3.1. Resultados de los parámetros de corte

	Variables			Resultados				
	n_r (rev/min)	t (mm)	S (mm/rev)	Vc	$T_{m_{ref}}$	i	Y	Tmt
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	3	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 ($\alpha = 6^\circ$), la transición de la temperatura en el material de trabajo es gradual y 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.

El ángulo del plano cortante tiene una gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte; influye sobre los requisitos de fuerza y de potencia, sobre el espesor y la temperatura de la viruta (debido al trabajo de deformación). En consecuencia, se ha dado mucha importancia a determinar las relaciones entre el ángulo del plano cortante y las propiedades del material de la pieza y las variables del proceso de corte.

3.3. 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 2.5 se determinó la vida útil de la herramienta para las diferentes condiciones de torneado. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.2. Resultados obtenidos de la vida útil de la herramienta

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

Como se observa en la tabla 3.2 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 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).

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 min (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.

3.4. Análisis de la distribución de la temperatura y flujo de calor

La distribución de temperatura, el flujo de calor y la zona de mayor influencia térmica en las interfases herramienta-pieza y herramienta-viruta durante el mecanizado del acero AISI 1045 mediante el proceso de corte ortogonal se muestran en la figura 3.1 (a), 3.1 (b) y 3.1 (c). Este estudio se realizó para un número de revoluciones del husillo de 54 rev/min, un avance de 0,25 mm/rev y una profundidad de corte de 7 mm.

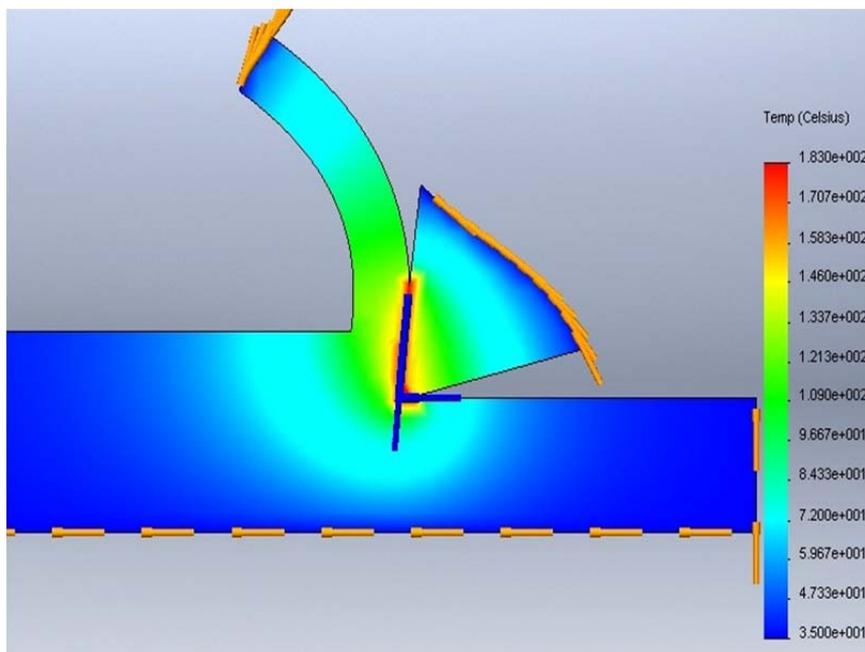


Figura 3.1 (a). Distribución de temperatura

En la figura 3.1 (a) se observa que con parámetros de corte más bajo seleccionados de 54 rev/min, $s = 0,25$ mm/rev y $t = 7$ mm en la zona primaria se obtiene una

temperatura de 183 °C, por ser el mayor tiempo de exposición al que están expuesto la cuchilla con la pieza, la fricción al actuar consecuentemente por efecto de este contacto y no tener lubricación, esta se incrementa.

Luego se observa que estas temperaturas, que por la conductividad térmica del acero AISI 1045 de 47 W/(m·K) se distribuye en toda la zona de corte transmitiéndose a la interfase de la viruta con un valor de 146 °C hasta llegar a un valor de 72 °C en las zonas cercanas donde no ejerce influencia la energía térmica.

De estas energías, la primera es almacenada por el material y no genera calor, mientras que las otras dos son de carácter disipativo, ya que las deformaciones plásticas producen rozamientos internos y originan la transformación de la energía mecánica en calorífica.

En los procesos de maquinado es importante conocer el aumento de temperatura por los fenómenos siguientes: una temperatura excesiva afecta negativamente la resistencia, dureza y desgaste de la herramienta de corte. Al aumentar el calor se provocan cambios dimensionales en la parte que se máquina y dificulta el control dimensional. El calor puede inducir daños térmicos en la superficie mecanizada que afectan negativamente sus propiedades. La misma máquina herramienta se puede exponer a temperaturas elevadas y variables, causar distorsión y en consecuencia, mal control dimensional de la pieza, criterios que coinciden con Trent (2000).

La figura 3.2 (b) se corresponde con el flujo de calor obtenido en el proceso de corte.

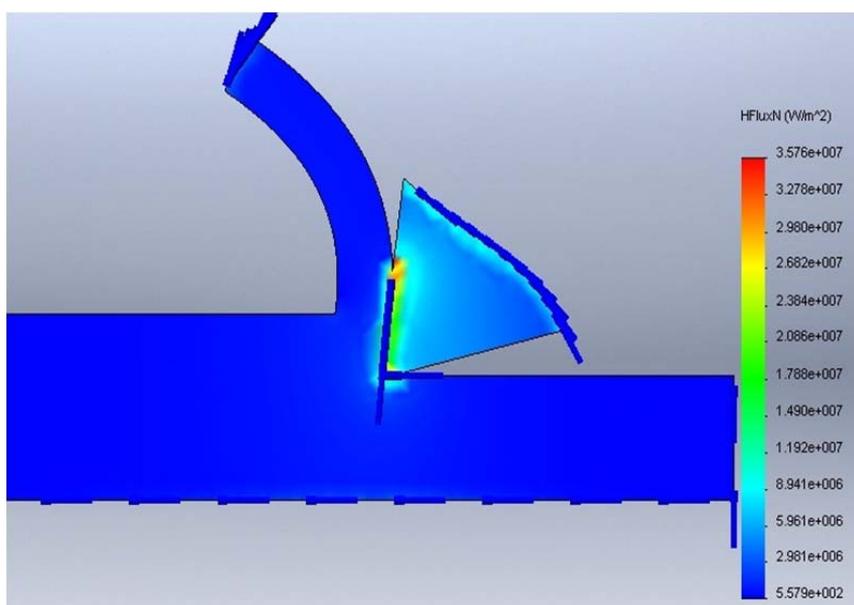


Figura 3.1 (b) Flujo de calor.

Por otra parte en la figura correspondiente al flujo de calor (figura 3.1 b) se presencia que la mayor cantidad de energía calorífica es absorbida por la herramienta, valor que asciende hasta los $3,57 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, lo cual tiene como consecuencia afecciones a la vida útil de la misma. La zona de mayor influencia térmica correspondiente a esta zona no excede los 10 mm de distancia desde la interfase hasta el borde de la pieza de trabajo, lo cual no quiere decir que no ocurra un efecto acumulativo en la temperatura de la pieza de trabajo, la misma no excede los $45 \text{ }^\circ\text{C}$.

La obtención de estas temperaturas está determinada por el valor del ángulo de desprendimiento de la cuchilla (-5°), ya que este ángulo tiene mucha influencia en la generación de las temperaturas y en el flujo del calor, ya que esta está provocada por una combinación del filo cortante y cara de desprendimiento.

Al disminuir el ángulo de desprendimiento y aumentar la fricción en la cara de contacto entre herramienta y viruta, el ángulo del plano cortante disminuye y la viruta se hace más gruesa según lo planteado por Childs *et al.* (2000). 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.

La figura 3.1 (c) se corresponde con la zona de mayor influencia térmica durante el mecanizado por corte ortogonal del acero AISI 1045 con 54 rev/min , $s = 0,25 \text{ mm/rev}$ y $t = 7 \text{ mm}$.

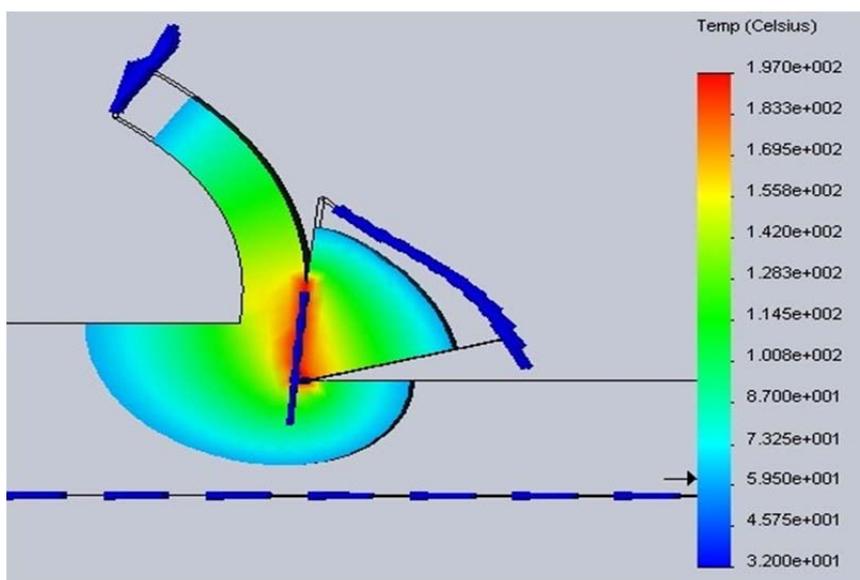


Figura 3.1 (c) Zona de mayor influencia térmica.

Para este campo de temperaturas generadas durante el mecanizado por corte ortogonal, la cual se distribuyen de manera peculiar teniendo, la fuente de calor su origen en la zona principal y secundaria de cizallamiento, se observa que la temperatura es disipada prácticamente de manera equitativa en las interfases herramienta - viruta y herramienta-pieza de trabajo, en la cual se obtuvo una distribución de la misma que desciende desde los 197 °C generados en el filo de corte de la herramienta hasta la temperatura ambiente.

En las siguientes figuras (3.2 (a) ;(b); (c)) se muestran los resultados del estudio del proceso de mecanizado por corte ortogonal donde los parámetros de corte son los siguientes: número de revoluciones del husillo $n = 75$ rev/min, avance $S = 0,43$ mm/rev y una profundidad de corte $t = 7$ mm.

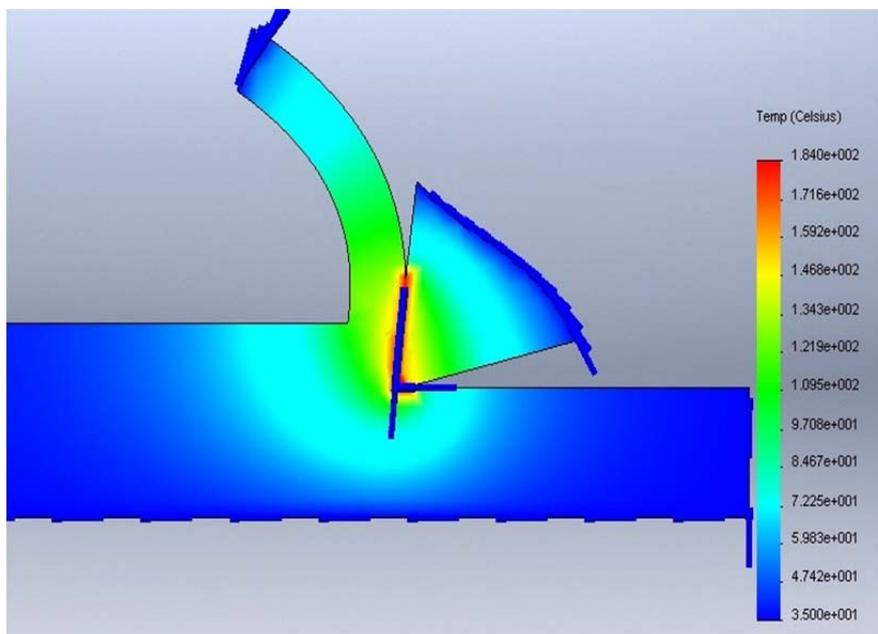


Figura 3.2 (a). Distribución de la temperatura.

Se observa que con un incremento en los parámetros de corte de 21 rev/min y de 0,18 mm/rev en el avance, se incrementa la temperatura hasta 184 °C, donde entre la interfase entre la herramienta pieza, por efecto de la conductividad térmica, desciende a un valor de 146 °C y se distribuye en toda la interfase hasta que adquiere un valor de 109 °C entre la viruta y el centro de la plaquita de carburo metálico del tipo T 15 K 6.

De acuerdo con estos resultados se puede plantear que 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.

Las temperaturas obtenidas dependen fuertemente de parámetros como la fricción y la rugosidad en la interfase para velocidades de corte inferiores a 1 m/s. Para las velocidades de corte superiores, la fricción depende tanto de la velocidad como de la presión normal aplicada en la interfase.

En relación a la zona primaria de deformación, la temperatura depende del ángulo principal de posición si este se varía según las velocidades de corte que se empleen, ya que a grandes velocidades de corte, el coeficiente de fricción aparente disminuye de forma significativa, según el criterio de Baker (2000).

La figura 3.2 (b) está relacionada con el flujo de calor obtenido con estos parámetros.

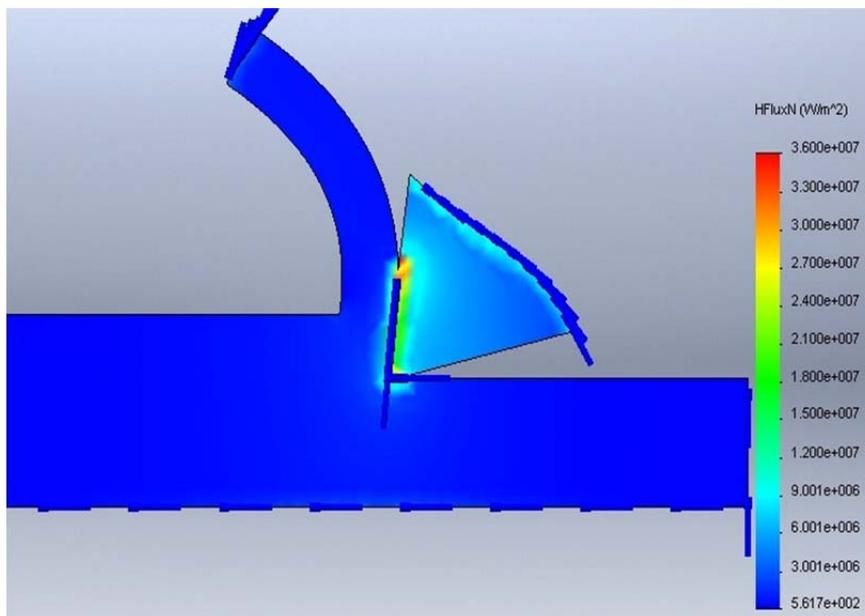


Figura 3.2 (b). Flujo de calor.

Al identificar los focos de calor mediante la representación del mapa de los flujos de calor que se observan en la figura 3.2 (b), en la zona de la interfase se ha alcanzado una flujo de calor de $3,60 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ y que luego disminuye hasta $1,80 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ en la zona próxima al filo de la herramienta.

Se observa que existe un estado estacionario del calor con un valor de $0,60 \text{ W/mm}^2$ en toda la superficie de la plaquita, un calor que ha sido generado por las condiciones siguientes: un calor generado por deformación plástica en las zonas primaria y secundaria de deformación, respectivamente y un calor generado por fricción en las superficies de desprendimiento y de incidencia, respectivamente.

Esto indica que el flujo de calor aumenta hasta los $3,60 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, en este caso existe un mayor índice de afectación a la herramienta puesto que el mayor flujo de calor se dirige hacia la misma.

Un aumento en los parámetros de corte como, número de revoluciones del husillo hasta 110 rev/min, un avance de 0,25 mm/rev y una profundidad de corte de 5 mm, se obtienen los siguientes resultados para el análisis térmico representados en las figuras 3.3 (a) y 3.3 (b).

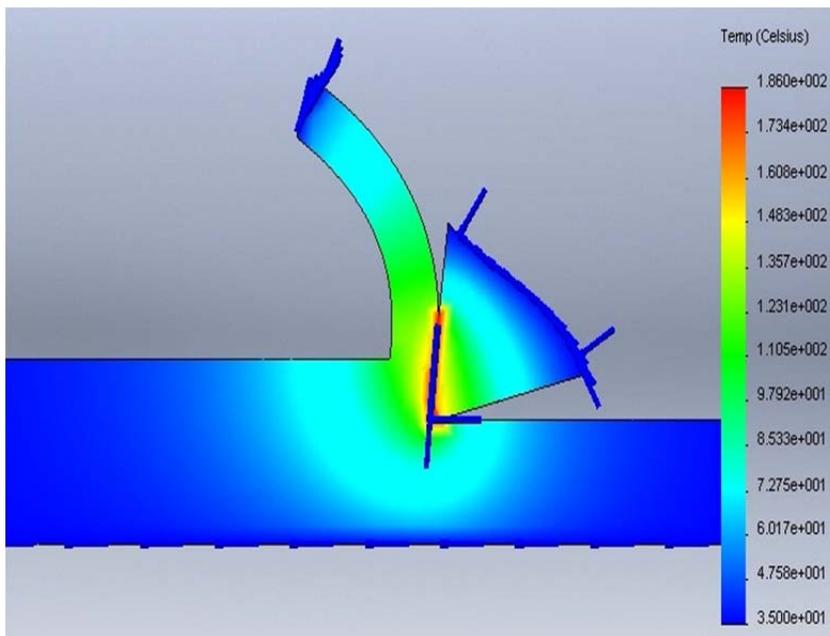


Figura 3.3 (a) Distribución de temperatura.

Debido al aumento de los parámetros de corte en el proceso de mecanizado, se obtuvo una distribución de temperatura la cual oscila entre 186 °C en la zona de cizallamiento primaria y la temperatura en el volumen de la pieza, la cual es desde 40 hasta 45 °C. Se observa que a medida que aumenta la velocidad de corte disminuye el tamaño del borde acumulado.

De acuerdo con los resultados de la figura 3.3 (a) se puede contactar que en la zona que corresponde a la punta de la herramienta, la temperatura aumenta de forma significativa (alrededor de unos 186 °C) con el aumento de la velocidad de corte, pero, al contrario, para el caso de la llamada zona de adhesión (material pegado a la punta de la herramienta) impide la creación de calor proveniente de la energía de fricción debido de la velocidad de deslizamiento cuasi nula del material allí.

La temperatura en esta zona (evaluada entre 173 y 186 °C) proviene entonces en gran medida de la disipación de la energía de deformación plástica que ocurre en la zona primaria de cizallamiento.

La temperatura máxima aumenta de manera uniforme, pero, el aumento de la temperatura es importante para bajas y medianas velocidades de corte, después, a partir de $V_c = 15 \text{ m/s}$, el aumento de la velocidad máxima es menos pronunciado. El hecho que, a medida que la velocidad de corte aumenta, se acerca a un régimen donde el calor generado en la interfase no tiene el tiempo necesario para difundirse y genera entonces ablandamiento del material.

La figura 3.3 (b) se corresponde con el flujo de calor obtenido con estos parámetros.

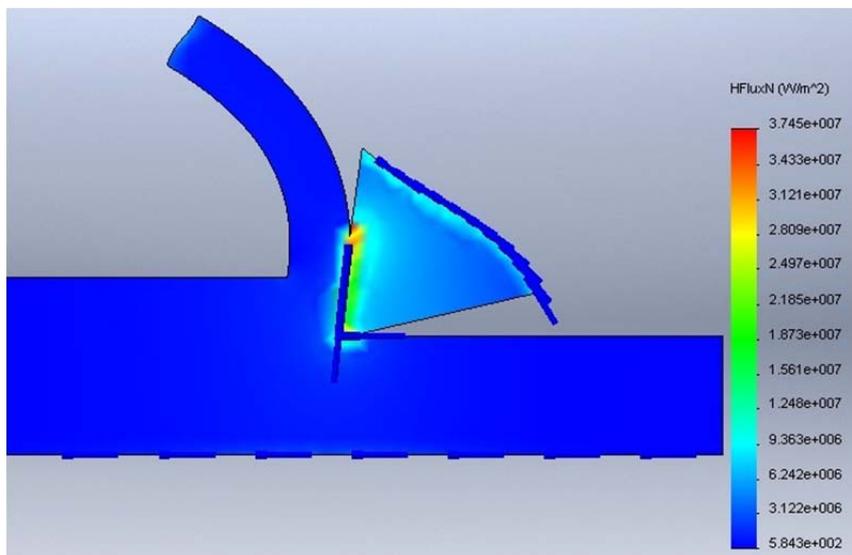


Figura 3.3 (b) Flujo de calor.

Con respecto al flujo de calor en las interfases, en el mismo hubo un ascenso hasta los $3,75 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, donde también se observa que la mayor parte de la energía es disipada por la herramienta.

A altas velocidades de corte, casi todo el calor generado por la energía de fricción se evacua con la viruta. La partición del calor en la interfase está determinada al aplicar la igualdad de la temperatura entre las dos superficies en contacto ya que cada superficie tiene un valor de temperatura inicial definido. Se dedujo que el valor de la partición del calor podía depender de la conductancia térmica de la interfase, la continuidad de temperatura en la interfase asegurada por el alto valor de la conductancia térmica debería, en principio, imponer esta partición del calor entre las dos superficies.

Se determinó, según el flujo de calor que el aumento del nivel de la energía de fricción se debe sobre todo al crecimiento, con respecto a la velocidad de corte, de la velocidad de deslizamiento del material en la interfase, también se observa que la variación de la temperatura en la interfase del lado de la viruta parece ser poco sensible al fuerte aumento de la conductancia térmica en la interfase.

Por el otro lado, se observa como la temperatura en la interfase en el lado de la herramienta disminuye fuertemente con el aumento de la conductividad térmica. Este resultado nos lleva a considerar la hipótesis a que haya más calor que se evacua en la viruta cuando se aumenta este parámetro.

En las figuras 3.4 (a) (distribución de temperaturas) y la 3.4 (b) (flujo de calor) se muestran los resultados del estudio del proceso de mecanizado por corte ortogonal donde los parámetros de corte considerados fueron: número de revoluciones del husillo; $n = 300$ rev/min, avance $S = 0,35$ mm/rev y una profundidad de corte $t = 5$ mm.

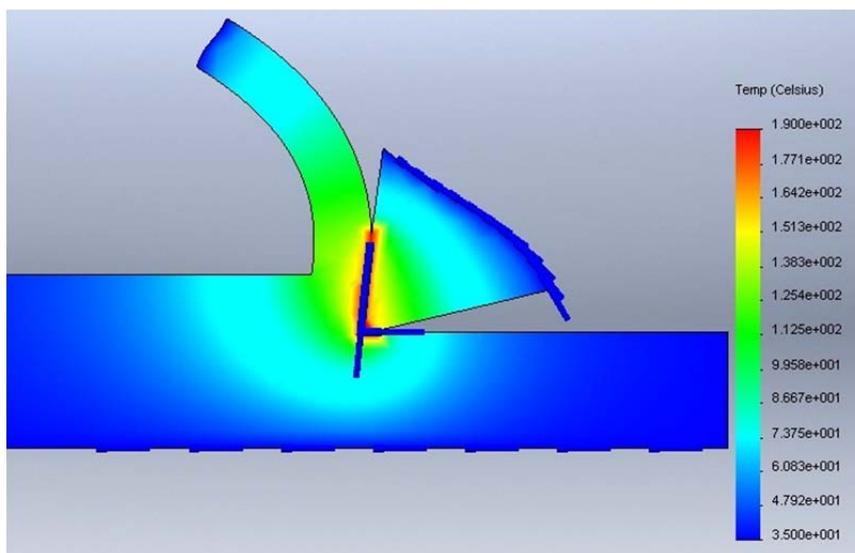


Figura 3.4 (a). Distribución de temperatura.

Para mayor número de revoluciones, en este caso 300 rev/min, se obtiene una distribución de las temperaturas que van desde 190 hasta 151 °C en la interfase herramienta pieza. La otra temperatura originada es la que se presenta en la viruta y en la plaquita de carburo que es de 138 °C. Se observa con respecto a la energía de fricción disipada, del calor total que penetra dentro de la viruta en un punto dado en un instante determinado.

El calor que penetra en la viruta por la interfase sólo puede tener dos orígenes: la energía de fricción o el transporte de calor de la herramienta (en este caso, la

herramienta debería ser más caliente que la viruta). En el caso donde se inhibe el traspaso de calor entre las dos superficies en contacto, el único flujo de calor que penetra la viruta, proviene de la disipación de la energía de fricción.

La magnitud de la energía de fricción creada en un punto dado de la interfase es del orden de 124 °C, con lo que una diferencia de unas décimas de grados en la interfase resultaría en la generación de un flujo de calor de $3,85 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, la misma magnitud que la energía de fricción disipada entre las dos superficies en contacto.

La figura 3.4 (b) es el flujo de calor obtenido para estos parámetros.

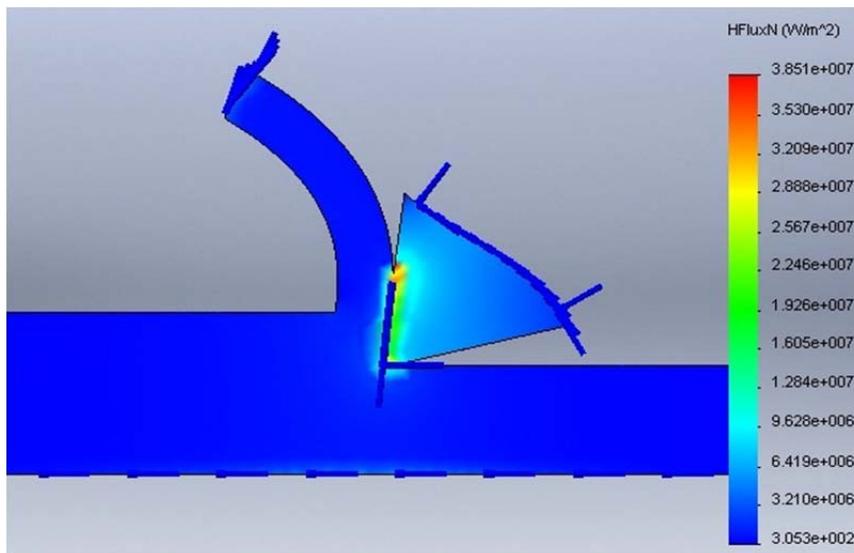


Figura 3.4 (b) Flujo de calor.

En la figura se observa el flujo de calor que penetra la viruta para 300 rev/min, pero para una profundidad de corte de 5 milímetros. La fracción de la energía de fricción que se evacua en la viruta y el flujo térmico generado por el transporte de calor entre las dos superficies en contacto a diferentes parámetros de conductancia térmica en la interfase, para estas condiciones de mecanizado por corte ortogonal, es diferente. Aquí en la interfase de contacto herramienta - pieza, se ha obtenido un flujo de calor de $3,85 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ y en el filo de la herramienta se genera un flujo de calor desde 2,56 hasta $1,60 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, el más alto de todos los regímenes de elaboración empleados a pesar de considerar una menor profundidad de corte (5 mm).

Considerar la continuidad de la temperatura en la interfase resulta en crear un flujo de calor que va de la herramienta hacia la viruta, que es la causa de la diferencia entre el valor de la fracción de calor obtenida.

En los procesos de mecanizado y en concreto en el corte ortogonal, las características del material se ven influenciadas por las altas temperaturas, las velocidades y las deformaciones que se producen durante el proceso. Esto se traduce en dos fenómenos fundamentales; por un lado la necesidad de una ecuación constitutiva que contemple la variación de la curva tensión - deformación con la temperatura y la velocidad de deformación; por otro lado la aparición de fractura dúctil en el material.

En el intervalo de las velocidades estudiadas se ha comprobado que en ninguno de los casos el flujo de calor llegó a los bordes externos de la herramienta con lo que se dio por válida la definición de las condiciones de contorno térmicas del modelo presentado. La velocidad de corte tiene una influencia de gran importancia sobre el valor de la fracción de calor implementada sólo si se considera la hipótesis de continuidad de la temperatura entre la herramienta y la viruta.

3.5. Análisis estadístico

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores, pero se evita que se cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos.

Para la evaluación del análisis estadístico, se emplearon los Software Excel, con el cual se graficaron las diferentes curvas en arreglo a los datos de entrada y de salida. Los resultados obtenidos se procesaron con el software Statgraphics Plus V 5.1 Español, del cual fueron extraídos los resúmenes y valoraciones realizadas en cada probeta.

3.5.1. Análisis de regresión del número de revoluciones vs temperatura

En el análisis de regresión, calcula para cada punto el cuadrado de la diferencia entre el valor Y estimado para ese punto y su valor Y real. La suma de estas diferencias cuadradas se denomina suma de los cuadrados residual.

Cuanto menor sea la suma residual de los cuadrados, en comparación con la suma total de los cuadrados, mayor será el valor del coeficiente de determinación, r^2 , que es un indicador de hasta qué punto la ecuación resultante del análisis de regresión explica la

relación entre las variables. Los datos fueron procesados por el análisis de regresión, en la tabla 3.3, se muestran los resultados de dicho análisis.

Tabla 3.3. Resultados de la fuerza de corte y la temperatura obtenidos

	Variables			Resultados		
	n_r (rev/min)	t (mm)	S (mm/rev)	Vc	Fc (N)	T (°C)
1	54	7	0,25	8,4	130	160
2	75	7	0,43	11,7	299	170
3	110	5	0,25	17	321	180
4	300	3	0,35	47	420	195

En correspondencia con los parámetros de corte empleados, se han obtenidos diferentes fuerza de corte y diferentes temperaturas. Se observa en la tabla 3.2 que en la medida que se incrementa el número de revoluciones, existe un incremento de la temperatura en la interfase herramienta - pieza y herramienta - viruta durante el mecanizado del acero AISI 1045 con el empleo de plaquita de carburo metálico del tipo T 15 K 6.

El comportamiento del análisis de regresión realizado del número de revoluciones con respecto a la temperatura se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.4. Análisis de regresión lineal

Variable dependiente: Temperatura					
Variable independiente: Número de revoluciones					
Error Estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
Ordenada	159,619	5,71482	27,9308	0,0013	
Pendiente	0,123419	0,0343617	3,59176	0,0695	
Análisis de la Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	578,99	1	578,99	12,90	0,0695
Residuo	89,7605	2	44,8802		
Total (Corr.)	668,75	3			
Coeficiente de Correlación = 0,930472					
R-cuadrado = 86,5779 porcentaje					
Error estándar de est. = 6,69927					
Error absoluto medio = 3,96445					
Estadístico de Durbin-Watson = 1,7663 (P=0,1063)					

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre la temperatura y el número de revoluciones. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Temperatura = 159,61 + 0,123 \cdot \text{número de revoluciones}$$

En la figura 3.5 se muestra el gráfico del modelo ajustado para temperatura y número de revoluciones.

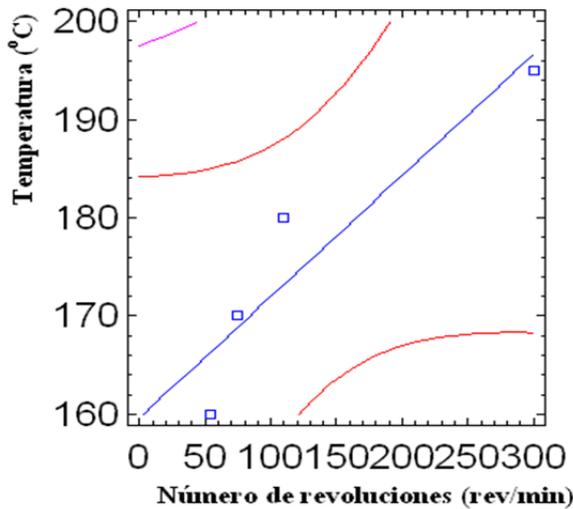


Figura 3.5. Modelo ajustado para temperatura y número de revoluciones.

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,10, existe relación estadísticamente significativa entre la temperatura y el número de revoluciones para un nivel de confianza del 90 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 86,57 % de la variabilidad en la temperatura. El coeficiente de correlación es igual a 0,93, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 6,69927. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 3,96445 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es superior a 0,05; no hay indicio de autocorrelación serial en los residuos.

3.5.2. Análisis de regresión de la profundidad de corte vs temperatura

Entre los parámetros que influyen sobre los procesos de mecanizado se destacan aquellos que pueden ser controlados por el operario, tales como la velocidad de rotación de la pieza o la herramienta, el avance longitudinal y la profundidad de corte, también llamado encaje axial. Por ser la distancia de penetración de la herramienta medida en perpendicular respecto a la superficie libre de la pieza, la misma define el efecto de la

temperatura durante los procesos de mecanizado, máximo cuando el proceso se realiza en seco.

En la tabla 3.5 se muestra el análisis de regresión lineal.

Variable dependiente: Temperatura					
Variable independiente: Profundidad de corte					
Error Estadístico					
Parámetro	Estimación	estándar	T	P-Valor	
Ordenada	217,5	8,66025	25,1147	0,0016	
Pendiente	-7,5	1,50756	-4,97494	0,0381	
Análisis de la Varianza					
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	618,75	1	618,75	24,75	0,0381
Residuo	50,0	2	25,0		
Total (Corr.)	668,75	3			
Coeficiente de Correlación = -0,961891					
R-cuadrado = 92,5234 porcentaje					
Error estándar de est. = 5,0					
Error absoluto medio = 2,5					
Estadístico de Durbin-Watson = 2,5 (P=0,0255)					

La salida muestra los resultados del ajuste al modelo lineal para describir la relación entre la temperatura y la profundidad de corte. La ecuación del modelo ajustado es:

$$Temperatura = 217,5 - 7,5 \cdot \text{profundidad de corte}$$

En la figura 3.6 se muestra el gráfico del modelo ajustado para temperatura y profundidad de corte.

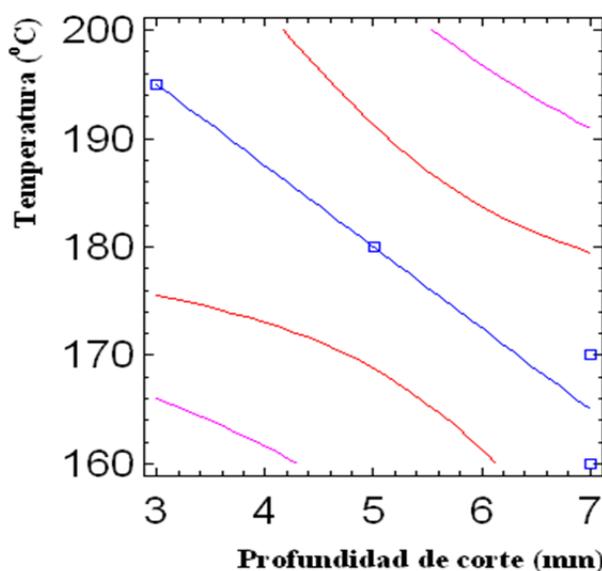


Figura 3.6. Modelo ajustado para temperatura y profundidad de corte.

Dado que el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,05, existe relación estadísticamente significativa entre la temperatura y la profundidad de corte para un nivel de confianza del 95 %.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 92,52 % de la variabilidad en la temperatura. El coeficiente de correlación es igual a -0,96; indicando una relación relativamente fuerte entre las variables. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 5,0. Este valor puede usarse para construir límites de la predicción para las nuevas observaciones.

El error absoluto medio (MAE) de 2,5 es el valor medio de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se han introducido los datos en el fichero. Dado que el p-valor es inferior a 0,05; hay indicio de una posible correlación serial.

La relación de corte es un parámetro útil e importante para evaluar las condiciones del corte, ya que el espesor de la viruta no deformada es un ajuste de la máquina y en consecuencia es conocido. La relación de corte se puede calcular midiendo el espesor de la viruta con un micrómetro de tornillo o de carátula.

Como también se conoce el ángulo de ataque para determinada operación de corte, la ecuación permite calcular el ángulo del plano cortante en el corte ortogonal. Analizando el modelo de corte ortogonal en exámenes microscópicos se ha observado que las virutas se producen por el proceso de cizallamiento, acción que se produce a lo largo de la zona de cizallamiento, una zona muy pequeña en la que se concentra la deformación.

El ángulo del plano cortante tiene una gran importancia en la mecánica de las operaciones de corte; influye sobre los requisitos de fuerza y de potencia, sobre el espesor y la temperatura de la viruta (debido al trabajo de deformación).

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, selección de material, mano de obra, energía eléctrica. Todo ello sin dudas repercute económicamente en el proceso experimental. Los costos asociados al proceso de corte se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6. 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
Sub total				81,50
Costos de mano de obra				
No	Especialidad	\$/horas	Horas trabaj.	Costos total
1	Mecán taller "A"	12,08	4	48,32
2	Programador	2,75	2	5,50
Sub total				53,82

Luego de realizado el análisis económico del proceso de torneado del acero AISI 1045 para determinar el efecto de la temperatura 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 145,32 CUP.

3.7. Valoración del impacto ambiental

Algunos de los procesos tecnológicos de producción que se deben estudiar y valorar cuidadosamente son los de elaboración de los metales por corte, mediante el torneado, fresado, taladrado, rectificado y acepillado. Operaciones que se ejecutan en casi todas las fábricas y talleres del país, y cuya influencia sobre el consumo energético y gasto de materiales es elevado.

En estas operaciones la productividad y calidad de las piezas que se elaboran, dependen, entre otros parámetros, del correcto cálculo y establecimiento de los elementos del régimen de corte. La alteración de alguno de estos elementos, además de afectar la productividad de piezas, así como, el acabado y precisión de las mismas, lo que traería como consecuencia el incumplimiento de su asignación de servicio y afectaciones a otras piezas de las máquinas y mecanismos donde se instalan.

Si se tiene en cuenta que existen miles de máquinas herramienta en las fábricas y talleres de todo el país, los errores tecnológicos que se cometen diariamente multiplican innecesariamente el consumo energético, aumentando al mismo tiempo su efecto negativo sobre el medio ambiente.

Algunos de estos conceptos son: medio ambiente, actitud, aguas subterráneas, agua contaminada, agua potable, aguas superficiales, aguas territoriales, atmósfera, biodegradable, bioenergía, biogás, biósfera, calentamiento global, calidad ambiental,

capa de ozono, conservación, comunidad ecológica, conciencia ambiental, comunidad, comunidad escolar, contaminación, contaminación subjetiva, contaminante, calentamiento global, desecho ambiental, dióxido de carbono, efluentes, energía, impacto ambiental, lluvia ácida, metales pesados, metano, monóxido de carbono, naturaleza, nivel de ruido, oxidación, ozono, efecto invernadero, gases de efecto invernadero, productos peligrosos, daño ambiental, delito ambiental, derecho ambiental, desechos, desechos peligrosos, desechos tóxicos, minimización, recuperación, solución ambiental, stress, tecnología limpia, yacimiento y otros que se consideren necesarios por su relación con el medio ambiente.

3.7.1. Incidencia ambiental de la tecnología

Encontramos a la tecnología como concepto amplio que abarca un conjunto de técnicas, conocimientos y procesos, que sirven para el diseño, transformación y construcción de objetos para satisfacer necesidades humanas. Todo conocimiento conlleva el riesgo del error y de la ilusión. La educación del futuro debe contar siempre con esa posibilidad. El conocimiento humano es frágil y está expuesto a alucinaciones, a errores de percepción o de juicio, a perturbaciones y ruidos, a la influencia distorsionadora de los afectos, al imprinting de la propia cultura, al conformismo, a la selección meramente sociológica de nuestras ideas.

Aunque el desarrollo de la tecnología permite el ahorro de recursos materiales, tiene sus impactos negativos, estos están asociados a afectaciones visuales, en el sistema óseo muscular, problemas auditivos.

3.8. Conclusiones del capítulo

- Las variables y parámetros establecidos en los cálculos, posibilitaron la realización de las múltiples operaciones tecnológicas, con el consumo mínimo de los parámetros (energía y tiempo) y sin generar gastos superfluos por concepto de mecanizado.
- Se pudo establecer que con el incremento de las velocidades de corte, el espesor de la zona primaria de deformación disminuye, influido por las características del material, que tiene su incidencia en el tamaño de la zona primaria con el efecto de la resistencia, endurecimiento por deformación, la deformación y la conductividad térmica.
- Los regímenes de corte considerados como el número de revoluciones, el avance y la profundidad de corte permitieron establecer la distribución de las temperaturas en el acero AISI 1045 sometido a corte ortogonal en seco y con cuchilla de carburo de tungsteno del tipo T 15 K 6.



CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ Al determinar la distribución de temperaturas durante el corte ortogonal en seco del acero AISI 1045 se emplearon diferentes parámetros de corte como: número de revoluciones desde 54 hasta 300 rev/min, avances desde 0,25 hasta 0,43 mm/rev y profundidad de corte de 5 y 7 milímetros, los cuales influyen en el flujo de calor en las interfases herramienta - material y herramienta - pieza
- ❖ Durante el proceso de corte ortogonal en seco del acero AISI 1045 con plaquitas de carburo metálico y en correspondencia con los regímenes de corte empleados, se determinó variación en las temperaturas que fluctúan en la zona primaria y secundaria de corte entre 160 y 195 °C, las cuales pueden afectar la vida útil de la herramienta.
- ❖ Se estableció que para 54 rev/min, avance de 0,25 mm/rev y profundidad de corte de 7 mm, existe una temperatura en la zona primaria de 183 °C la cual disminuye hasta 133 °C en la interfase y para 300 rev/min; 0,35 mm/rev de avance y 5 mm de profundidad de corte, la temperatura es de 190 °C y disminuye hasta 151 °C en la interfase, lo que permite plantear que en la medida que se incrementan los parámetros de corte, existe incremento de la temperatura.
- ❖ Al estimar la valoración económica del proceso de simulación por el método por elementos finitos de la distribución del acero AISI 1045 por corte ortogonal, donde se consideró la mano de obra directa, concepto de tiempo y de consumo, se incurre en un costo total de 145,32 CUP.



RECOMENDACIONES

- ❖ Considerar en próxima investigación la incidencia de las temperaturas que se generan durante el proceso de corte ortogonal, pero teniendo en cuenta las diferentes fuerzas que dan lugar en los procesos de mecanizado bajo estas condiciones.
- ❖ Establecer en próximo trabajo como influye la energía de deformación elástica, la energía de deformación plástica y la energía de rozamiento durante el proceso de corte ortogonal en seco según los parámetros establecidos en este trabajo.
- ❖ Determinar en un próximo trabajo el efecto nocivo derivado del incremento de temperatura conocido como “filo recrecido”, cuya aparición depende de los materiales de las piezas y de herramienta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Åström, P. 2004 “Simulation of manufacturing processes in product development” Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Computer Aided Design 2004:56 • ISSN: 1402 -1544 • ISRN: LTU - DT - 04.56 – SE 2004:56
2. Attanasio, A.; Ceretti, E.; Giardini, C.; Filice, L.; Umbrello, D. 2008 “Criterion to evaluate diffusive wear in 3D simulations when turning AISI 1045 steel” 11th ESAFORM (European Scientific Association for material FORMing), Lyon, 2008
3. Al-Zkeri, I. 2007 “Finite element modeling of hard turning” Tesis Doctoral. Ohio State University
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. Camacho López, A.; 2005 “Análisis por el método de los elementos finitos de procesos estacionarios de conformado por deformación plástica” Tesis Doctoral. UNED. Escuela Superior de Ingeniería Industrial, Departamento de Construcción y Fabricación
8. Calamaz, M.; Coupard, D.; Girot, F. 2008 “A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti6Al4V” International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 48, pp. 275-288
9. Chao, B.; Trigger, K. 1953 “The significance of the thermal number in metal machining” Transactions of ASME. Vol. 75, pp. 109–120
10. Childs, T.; Maekawa, K.; Obikawa, T.; Yamane, Y. 2000 “Metal machining: theory and applications” Elsevier. Amsterdam Liu, K.; Melkote, S. 2006 “Material strengthening mechanisms and their contribution to size effect in micro-cutting” Journal of Manufacturing Science and Engineering Vol. 128, (3), pp. 730-738

11. Chen, J.; Li, J.; Sun, J.; Wang, Z.; Xu, Z. 2008 “The influence of material constitutive constants on numerical simulation of orthogonal cutting of titanium alloy Ti6Al4V” *Key Engineering Materials*. Vol. 375-376, pp 182-186
12. Dewhurst, P. On the non-uniqueness of the machining process, *Proc. Royal Society of London A* 360: 587 - 610, 1978.
13. Dewhurst, W., 1978 “On the non-uniqueness of the machining process” *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, A*. Vol. 360, pp. 587-610
14. Filipovic, A.; Stephenson, D. Minimum Quantity Lubrication (MQL) applications in automotive power-train machining. *Machining Science and Technology*, 10 (1): 3 - 22, 2006.
15. Fleischer, J.; Schmidt, J.; Xie, L.; Schmidt, C.; Biesinger, F. 2006 “2D tool wear estimation using finite element method” *Institute for Productions technic, University Karlsruhe (TH)*
16. Filice, L; Micari, F.; Rizzuti, S.; Umbrello, D. 2006 “A critical analysis on the friction modeling in orthogonal machining” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 47, (3-4), pp. 709-714
17. Groover, M. *Fundamentals of modern manufacturing: Materials, Processes and Systems*. 4ta Edición. Editorial John Wiley & Sons. 2010.
18. Ginjaume, A.; Torre, F. 2005 “Ejecución de procesos de mecanizado, conformado y montaje” *Cengage Learning Editores*
19. Groover, M. 1997 “Fundamentos de manufactura moderna, materiales, procesos y sistemas” *Editorial Prentice Hall*
20. Huang, Y. 2002, “Predictive modeling of tool wear rate with applications to CBN Hard turning,” *Tesis Doctoral, Georgia Institute of Technology, Georgia*.
21. Kalpakjian, S.; Schmid, S. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Cuarta Edición, México. 2002.
22. Kudo, H. Some new slip-line solutions for two-dimensional steady-state machining, *Inter. J. of Mechanical Science* 7: 43 - 55, 1965.
23. Komanduri, R.; Hou, Z. 2001 “Thermal modeling of the metal cutting process, Part 1: temperature rise distribution due to shear plane heat source” *International Journal of Mechanical Science*. Vol. 43, pp. 1715–1752
24. Lee, E.; Shaffer, B. The theory of plasticity applied to a problem of machining. *J. Appl. Mech.* 18: 405, 1951.

25. Liu, K.; Melkote, S. 2007 "Finite element analysis on the influence of tool edge radius on size effect in orthogonal process" International Journal of Mechanical Sciences Vol. 49, (5), pp. 650-660
26. Mackerle, J., 2003 "Finite element analysis and simulation of machining: an addendum. A bibliography 1996-2002" International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 43, (1), pp.103-14.
27. Merchant, M. Mechanics of the metal cutting process I. Orthogonal cutting, J. of Applied Physics 16: 267 - 275, 1945.
28. Merchant, M. 1945 "Mechanics of metal cutting and type 2 chip" Journal of Applied Physics. Vol. 16, pp. 267-318
29. Metals handbook ASM. Traditional Machining Processes: Milling, Vol. 16, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 9na ed: 303 - 323, 1978.
30. Micheletti, G. 1986 "Tecnología mecánica. Mecanizado por arranque de viruta" Editorial Blume
31. Miguelez, H.; Zaera, R.; Rusinek, A.; Moufki, A.; Molinari, A. Numerical modeling of orthogonal cutting: Influence of cutting conditions and separation criterion, Journal de Physique IV (134): 417 - 422, 2006.
32. Miguelez H.; Zaera R.; Cheriguene R.; Rusinek A.; Moufki A.; Molinari A. 2007 "Modelización numérica del corte ortogonal utilizando una formulación ALE" VIII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Cuzco. 2007
33. 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.
34. Molinari, A; Nouari, M. 2002 "Modeling of tool wear by diffusion in metal cutting" Vol. 252, (1-2), pp. 135-149
35. Okushima, K.; Hitomi, K. 1961 "An analysis of the mechanism of orthogonal cutting and its application to discontinuous chip formation" ASME Journal of Engineering for Industry. Vol. 83, pp. 545-556
36. Oxley, P. Mechanics of machining, Ellis Horwood, Chichester, UK, 1989.
37. 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.
38. Piispanen, V. 1948 "Theory of formation of metal chips" Journal of Applied Physics Vol. 19, pp. 876-881



39. Raczky, A.; Elmadagli, M.; Altenhof, W.; Alpas, A. 2004 "An eulerian finite-element model for determination of deformation state of a copper subjected to orthogonal cutting" *Metallurgical and Materials Transactions*. Vol. 35, (8), pp. 2393-2400
40. Sandvik Coromant., *El Mecanizado Moderno: manual práctico*, AB Sandvik Coromant, Suecia, 1994. , I-30- I-35, II-38, X-2 - X-11.
41. Shaw, M.; Finnie, I. 1955 "The shear stresses in metal cutting" *Transactions of American Society of Mechanical Engineers*. Vol. 77, (2), pp. 115-125
42. Strenkowski, J.; Athavale, S. 1997 "Partially constrained eulerian orthogonal cutting model for chip control tools" *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol.119, (4B), pp. 681-688
43. Takeyama, H.; Usui, E. 1960 "A photo elastic analysis of machining stresses" *Journal Engineering for Industry*. Vol. 22, (9), pp. 342-349
44. Trent, E.; Wright, P. 2000 "Metal Cutting" *Butterworth-Heinemann*, 225 Wildwood Avenue, Woburn
45. Tyan, T.; Yang, W. 1992 "Analysis of orthogonal metal cutting process" *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. Vol. 34, (1), pp. 365-389
46. Umbrello, D.; Filice, L.; Rizzuti, S.; Micari, F.; Settineri, L. 2006 "On the effectiveness of finite element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction" *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 189, (1-3), pp. 284-291
47. Umbrello, D. 2008 "Finite element simulation of conventional and high speeds machining of Ti6Al4V alloy" *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 196, (1-3), pp. 79-87
48. Wince, J. 2002 "Modeling chip formation in orthogonal metal cutting using finite element analysis" *Tesis Doctoral*. Mississippi State University