

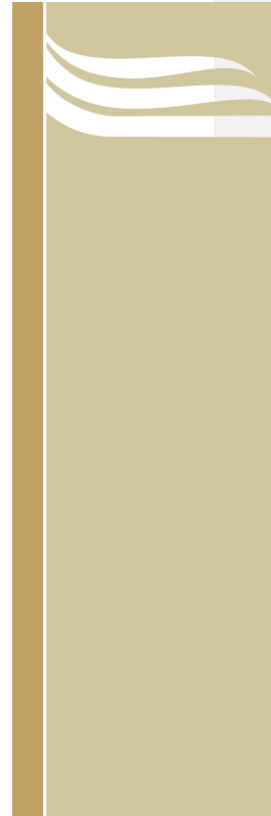
UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA EN EL MAQUINADO DE ALTA
VELOCIDAD DEL ACERO AISI 1045**

KARELL RODRÍGUEZ ZALDÍVAR

HOLGUÍN
2015



UHo UNIVERSIDAD
DE HOLGUÍN
OSCAR LUCERO MOYA

UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN
“Oscar Lucero Moya”
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

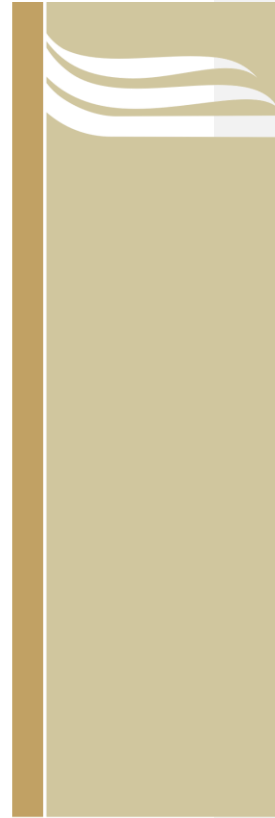
TRABAJO DE DIPLOMA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE
TEMPERATURA EN EL MAQUINADO DE ALTA
VELOCIDAD DEL ACERO AISI 1045**

Autor: KARELL RODRÍGUEZ ZALDÍVAR

**Tutores: Dr.C. Roberto Pérez Rodríguez
Dra.C. Ana María Quesada Estrada**

HOLGUÍN
2015



UHo UNIVERSIDAD
DE HOLGUÍN
OSCAR LUCERO MOYA

RESUMEN

En el contexto nacional se demanda el estudio del corte de metales a altas velocidades, de manera que se pueda tener una aproximación lo más cercano a la realidad y de esta manera permitirse tomar decisiones sin tener que hacer costosos experimentos. La presente investigación se propuso como objetivo general realizar la simulación numérica del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 con herramientas de corte P10, P15 y P25, para obtener las ecuaciones que caracterizan el comportamiento de temperatura en los insertos a tres velocidades de corte: 400, 500 y 600m/min. La modelación numérica de la distribución de la temperatura en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 se realizó con el software DEFORM-2D™. Se observó un comportamiento de la temperatura en la superficie de incidencia similar para las tres velocidades de corte estudiadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min). Esto indica que estas herramientas de corte P10, P15 y P25, en esta superficie, no sufren alteraciones notables en su comportamiento al trabajar a altas velocidades de corte. No sucede así con el caso del inserto P10, debido a que no posee capas de protección térmica.

ABSTRACT

The study of the cut of metals is demanded to loud velocities in the national context, so that what's closest may have an approximation itself to reality and this way allowing oneself to take decisions without having that to do costly experiments. Present it investigation AISI set for himself as general objective accomplishing the numerical simulation of the mechanization of loud velocity of steel 1045 with cutting tools P10, P15 and P25, in order to obtain the equations that characterize the behavior of temperature in the inserts to three court's velocities (400, 500 y600) m min. The numerical modelation of the distribution of the temperature in the mechanization of loud velocity of steel AISI 1045 2DTM sold off with the software DEFORM itself. A behavior of the temperature on the surface of similar incidence for the three velocities of court studied was observed (400 m min, 500 m min and 600 m min). This indicates than these cutting tools, in this surface, do not suffer notable alterations in their behavior when working loud velocities of court. P10, because does not possess capes of thermic protection does not happen that way with the case of the insert.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo1. ANTECEDENTES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTAS	5
1.1 Generalidades del proceso de mecanizado por arranque de virutas	5
1.2 Fuentes de calor y su distribución en el mecanizado	6
1.3 Simulación del mecanizado de alta velocidad por computadoras	8
1.4 Caracterización de los softwareMEF para la simulación del mecanizado ..	13
1.4.1 Formulaciones MEF utilizadas en el proceso de mecanizado.....	14
1.4.2 Caracterización de los software MEF para el proceso de mecanizado	15
CONCLUSIONES	19
Capítulo 2. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD DEL ACERO AISI 1045	20
2.1 Etapas del ciclo de análisis por el método de los elementos finitos	20
2.2 Comportamiento de los materiales y su modelación numérica	22
2.3 Modelación numérica del mecanizado con el software DEFORM/2D™	23
2.3.1 Modelación de las condiciones generales en el pre-proceso	25
2.3.2 Base de la simulación numérica (HSM, acero AISI 1045) [32]	28
2.3.3 Modelo en dos dimensiones por el método de los elementos finitos del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045.....	29
2.4 Modelación numérica de la temperatura en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045.....	32
2.4.1 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P10	33
2.4.2 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P15	38
2.4.3 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P25	43
CONCLUSIONES	48

CONCLUSIONES GENERALES	49
RECOMENDACIONES	50
BIBLIOGRAFÍA.....	51

INTRODUCCIÓN

A través de los años la Revolución Cubana ha atravesado por una economía dependiente de sus relaciones con el exterior, lo que ha conllevado a depender de suministros y tecnologías foráneas. La reparación, el mantenimiento y la construcción de máquinas se ven influenciada en gran medida por la no disponibilidad de piezas y herramientas, aspectos acentuados por el bloqueo impuesto por los Estados Unidos. Por esta razón, los líderes de la Revolución Cubana se dieron la tarea de buscar alternativas y cambios para mejorar la economía.

Mediante un proceso de cambio en los lineamientos generales de la política económica y social del Partido y la Revolución, se aborda la necesidad imperiosa de una empresa cubana eficiente. El creciente e inevitable desarrollo impone la necesidad de partes y piezas con una calidad superficial y exactitud cada vez mayor, con un tiempo record de fabricación. A medida que se incrementan estos factores, aparecen nuevas tecnologías que aplicadas a los procesos de maquinado, ayudan a incrementar dichos factores. El desarrollo progresivo de las máquinas herramienta y las herramientas de corte, ha posibilitado la aplicación del maquinado de alta velocidad (HSM, *High Speed Manufacturing*) o corte de alta velocidad (HSC, *High Speed Cutting*), siendo ésta una de las formas de aumentar la eficiencia de los procesos productivos a través de la reducción de los tiempos de fabricación.

“Las mayores ventajas de la aplicación de la tecnología de corte con altas velocidades de corte están relacionadas con las elevadas tasas de remoción de virutas, reducción de los tiempos entre las diversas operaciones del proceso productivo, bajos esfuerzos de corte, lo que posibilita el maquinado de paredes finas sin distorsión de forma, disipación de calor a través de la viruta y con ello, reducción de las distorsiones y daños térmicos de la pieza, capacidad de obtener buenos niveles de rugosidad superficial, reducción de las rebabas, facilidad de remoción de las virutas de la región de corte y simplificación del herramental” [1].

La influencia del HSC está dada por la cantidad de metal removido en el tiempo, logrando una buena rugosidad superficial, disminuyendo al mismo tiempo las fuerzas de corte y la vida útil de la herramienta. Para lograrlo, se recurre a herramientas de corte avanzadas que pueden tener o no recubrimientos de pequeño espesor, esto, aparejado al estudio los procesos de difusión térmica que ocurren en la herramienta, ha revolucionado la industria del corte de metales.

Para lograr predecir la vida útil de la herramienta de corte se hacen necesarios estudios que logren un mejor diseño de las mismas. El desgaste de la herramienta es uno de los problemas, provoca una menor exactitud en las dimensiones de la pieza terminada, disminución de la integridad superficial de la herramienta, tensiones residuales, y aumento de las vibraciones. Este inconveniente encarece el costo del proceso, por ello, es importante el estudio de la temperatura que se genera en el proceso de corte de metales, pues el desgaste generalmente ocurre en aquellas zonas donde esta es más intensa.

En el contexto nacional se presenta un problema: la no existencia de investigaciones que relacionen la influencia del HSC en el maquinado del AISI 1045 con insertos P10, P15 y P25 a velocidades de (400,500 y 600) m/min.

Por las razones antes mencionadas, se identifica el siguiente **problema científico**: ¿Cómo obtener mediante la simulación del maquinado del AISI 1045 las ecuaciones que caractericen el comportamiento de la temperatura en los insertos P10, P15 y P25?

El **objeto de estudio** de la investigación es el proceso de simulación numérica por el método de elementos finitos del mecanizado por arranque de virutas.

Como **campo de acción** se definió el proceso de simulación numérica de la distribución de temperaturas por el método de elementos finitos del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 con herramientas de corte P10, P15 y P25.

La investigación tiene como **hipótesis**: el desarrollo de un estudio de simulación numérica del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 con herramientas

de corte P10, P15 y P25, permitirá conocer la distribución de temperatura en los insertos.

Se identificó como **objetivo general de la investigación** realizar la simulación numérica del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 con herramientas de corte P10, P15 y P25, para obtener las ecuaciones que caracterizan el comportamiento de temperatura en los insertos.

Se definieron las siguientes **tareas de investigación** para el cumplimiento al objetivo general:

1. Sistematizar los fundamentos teóricos que sustentan el proceso de modelación numérica *Finite Element Method*(MEF) del corte de metales.
2. Modelar numéricamente el mecanizado del acero AISI 1045a velocidades de (400,500 y 600) m/min con insertos P10, P15 y P25.
3. Procesar las curvas de ajuste para obtener predictivamente la modelación de la distribución de temperatura en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 con insertos P10, P15 y P25.
4. Evaluar los resultados obtenidos.

Métodos principales utilizados en la investigación:

Método histórico – lógico: este se aplica para establecer el estado del arte del tema de investigación, como marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre las tecnologías.

Método de inducción - deducción: a partir del estudio de diferentes casos particulares se llegan a establecer aspectos que son generales y leyes empíricas, que constituyen puntos de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas de las cuales se deducen nuevas conclusiones lógicas que son sometidas a prueba de acuerdo con las generalizaciones empíricas. Se aplicará para la evaluación de los diferentes criterios que intervienen en la modelación numérica del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045.

Enfoque sistémico: durante la concepción del procedimiento y al definir la estructura que garantiza la organización del proceso.

Método de análisis y síntesis: se utiliza para identificar los factores principales y las características que influyen en el fenómeno que se estudia, así como su interrelación. Se aplica para identificar las etapas que intervienen en la utilización del método numérico para modelar el corte de metales.

Método de la simulación numérica: se utiliza para la modelación del proceso de corte de metales del mecanizado por alta velocidad del acero AISI 1045, utilizando el DEFORM 2D™.

Revisión documental: se utiliza para la búsqueda de los fundamentos teóricos y metodológicos de la investigación.

La tesis consta de: introducción, dos capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL MECANIZADO POR ARRANQUE DE VIRUTAS.

En este capítulo se realiza un estudio de los antecedentes en la simulación del corte de metales por computadoras, así como la descripción de los principales software comerciales disponibles.

1.1 Generalidades del proceso de mecanizado por arranque de virutas.

Las operaciones de maquinado han sido el centro de atención de la industria de fabricación desde la Revolución Industrial. El maquinado es un proceso de remoción de material que utiliza herramientas de corte y máquinas herramienta, para obtener las dimensiones y exactitud requeridas del producto. Las industrias de fabricación se esfuerzan por lograr en el proceso de maquinado un costo mínimo de producción o un máximo valor de producción, o la combinación óptima entre los dos enfoques, junto con la mejor calidad del producto. La selección apropiada del material de la pieza en bruto, de la herramienta de corte, de la máquina herramienta, de los fluidos de corte, de las condiciones de maquinado y el orden adecuado de las operaciones tecnológicas, son factores claves para el logro de estos objetivos [2].

El proceso de corte de metales es un proceso de deformación elasto-plástica donde la misma está altamente concentrada en una zona, por tanto, puede considerarse como un proceso que se caracteriza por la formación de las virutas y puede ser simulado utilizando el método MEF. La principal ventaja de este enfoque es su capacidad de predecir la formación de la viruta, las fuerzas de corte, la temperatura de la herramienta y las tensiones resultantes. Sin embargo, para conducir estas predicciones se requiere la tensión de fluencia del material y las velocidades de deformación. Los datos de estas variables que están disponibles se basan en experimentos de impactos a compresión a moderadas velocidades de deformación. Es evidente, entonces, la búsqueda de estas variables para la simulación MEF del mecanizado de alta velocidad [3].

El modelo clásico del corte ortogonal para la formación de la viruta continua asume las condiciones de deformación plana. La representación básica del proceso se ilustra en la Figura 1.1.

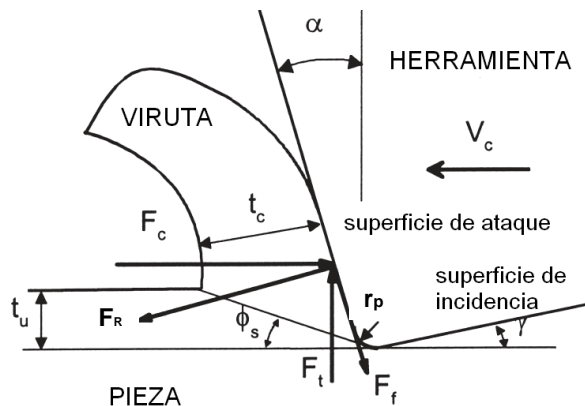


Figura 1.1 Fuerzas en el proceso de mecanizado (adaptado de [4]).

En el maquinado convencional, a bajas velocidades de corte, el mecanismo de fricción es más efectivo en la superficie de incidencia de la herramienta. Sin embargo, en el HSM debido al incremento considerable de la velocidad de contacto entre la viruta y la herramienta, la fricción es mucho más significativa en la superficie de ataque de la herramienta [3].

1.2 Fuentes de calor y su distribución en el mecanizado.

Como resultado del trabajo que se realiza en el corte de metales, se produce una generación de calor. Las fuentes fundamentales de generación de calor en el mecanizado son: (1) en la deformación plástica de la capa que se mecaniza y las capas adyacentes, así como la superficie de corte, y (2) en la fricción que ocurre entre la herramienta y la pieza que está siendo mecanizada y entre la herramienta y la viruta.

La cantidad de calor generado en el proceso de mecanizado puede determinarse a través de la ecuación (1.1) [5].

$$Q = \frac{F_z v}{E_c} 4.1868 \text{ [J]} \quad (1.1)$$

Acorde con las leyes de la Física, el calor generado en el proceso de corte de metales va desde puntos con alta temperatura, a puntos con menos temperatura. El balance térmico en este proceso se expresa a través de la ecuación (1.2).

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \text{ [J]} \quad (1.2)$$

Donde:

Q_1 : cantidad de calor que se evacúa a través de la viruta

Q_2 : cantidad de calor que se queda en la herramienta de corte.

Q_3 : cantidad de calor que pasa a la pieza maquinada

Q_4 : cantidad de calor que pasa al medioambiente por radiación.

Se ha observado que del 60 al 80 por ciento del calor generado en el proceso de corte se evacúa a través de la viruta. En la misma medida en que se aumenta la velocidad de corte, se aumenta este por ciento. En el proceso tecnológico de torneado, como promedio, se ha observado que del 50 al 86 por ciento del calor se evacúa a través de la viruta, del 10 al 40 por ciento pasa a la herramienta, del 3 al 9 por ciento pasa a la pieza y cerca del uno por ciento se irradia al entorno (Figura 1.2). La distribución de calor se ve afectada por varios factores, el más importante es la velocidad de corte y el espesor de la capa cortada [5].

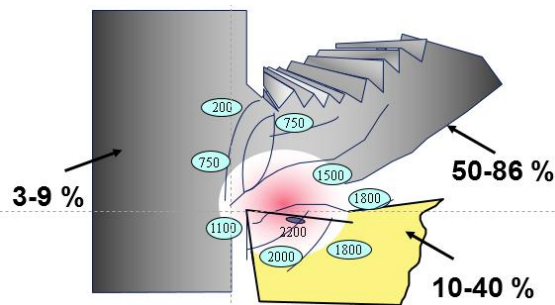


Figura 1.2 Distribución de la temperatura en el corte (adaptado de [6]).

Tanto en la herramienta como en la pieza, la distribución de calor no es uniforme.

En las capas de la viruta más cercanas a la superficie de ataque de la herramienta, la temperatura será superior que en aquellas capas más alejadas. Esto se debe a la deformación no uniforme de la capa que está siendo cortada durante la compresión de las mismas por la herramienta. De forma similar ocurre en la distribución de temperatura de la pieza.

En el caso de la herramienta de corte, la máxima temperatura se encuentra en las capas de frontera de las áreas de contacto con la viruta y con la pieza. La temperatura de las capas más alejadas, dependen de la conducción del calor [5].

Las investigaciones demuestran que la temperatura en la superficie de ataque es mayor como promedio que la temperatura media de la viruta. A medida que la viruta es más fina, se observa una mayor diferencia de temperatura. En el mecanizado del acero, la temperatura en la herramienta es de un 10 a un 50 por ciento mayor que la temperatura media de la viruta. En el caso del mecanizado del hierro fundido la diferencia es de un 100 a un 250 por ciento [5].

1.3 Simulación del mecanizado de alta velocidad por computadoras

Los primeros modelos del corte de metal se basaron solamente en la existencia del plano de cizallamiento [4, 7-11]. Las condiciones de fricción en la interface viruta – herramienta fueron ignoradas en los primeros modelos MEF o asumieron que era constante con un coeficiente basado en la ley de Coulomb [3].

Özel y Altan [3] presentaron una metodología para determinar simultáneamente la tensión de fluencia a altas velocidades de deformación y las temperaturas de la zona de corte, y la fricción en la interface viruta - herramienta. Esta información es necesaria para simular el mecanizado de alta velocidad utilizando los programas MEF. La técnica descrita fue utilizada para obtener la tensión de fluencia para un acero AISI 1020 para moldes con una dureza de 30 HRC, empleando herramientas de corte no recubiertas en el mecanizado de alta velocidad. La investigación no aborda el mecanizado del acero AISI 1045 (HSM) ni utiliza las herramientas de corte recubiertas.

Estos autores también desarrollaron una metodología para simular el proceso de corte en la operación de fresado frontal, para predecir la formación de la viruta, las fuerzas de corte, las tensiones en la herramienta y las temperaturas utilizando el análisis MEF a través del software DEFORM-2D®. Al comparar las fuerzas simuladas con las medidas experimentalmente, se mostró una aproximación razonable, al igual que las tensiones y las temperaturas [12]. Los autores se centran en el fresado frontal con fresas de vástago, en un acero para herramientas, no utilizan las herramientas de corte recubiertas.

Özel [13] investigó la influencia de la preparación del filo de corte en herramientas de CBN (Cubic Boron Nitride) utilizando simulaciones MEF para la alta velocidad. Se efectuaron un conjunto de ensayos experimentales con diferentes geometrías en herramientas de CBN y se midieron las fuerzas de corte generadas utilizando un dinamómetro acoplado a un sistema de adquisición de datos. La simulación numérica de estos experimentos mostró la distribución de tensiones, la temperatura en la zona de corte (Figura 1.3), las interfaces entre la herramienta-viruta y la pieza-herramienta.

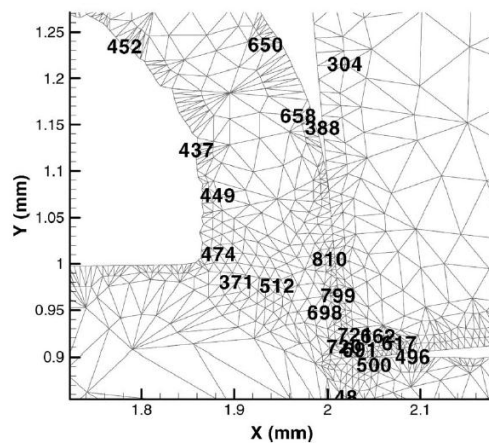


Figura 1.3 Distribución de temperaturas de herramienta con chaflán CBN [13].

Los resultados mostraron que una zona del material se forma bajo la acción de la geometría con chaflán que actúa como superficie de ataque. La presencia de un

chafilán afecta tanto a las fuerzas de corte como la temperatura, no así en el proceso de formación de la viruta. El autor aborda el análisis del mecanizado de alta velocidad para herramientas de corte CBN (modificando el tipo de geometría cortante) en un acero para herramientas, no utilizan las herramientas de corte recubiertas.

Özel y colaboradores desarrollaron una metodología para determinar la tensión de fluencia según los regímenes de corte y las características de fricción en la interface herramienta-viruta en el mecanizado ortogonal. Evaluaron múltiples modelos de temperatura para su cálculo en las zonas de deformación primaria y secundaria. Además, presentaron la comparación con los datos experimentales obtenidos en el mecanizado del acero AISI 1045 [3, 14, 15].

Özel y Zeren utilizaron una modelación MEF. Para simular de manera realística el HSM se empleó el remallado adaptativo, la simulación de aspectos dinámicos y el análisis de esfuerzos térmicos (Figura 1.4). Se simuló el flujo de la viruta a través de la herramienta sin implementar ningún criterio de separación de la viruta y sin utilizar un esquema de remallado [16]. Los autores abordan la simulación para los aceros AISI 1045, AISI 4340 y la aleación de titanio Ti6Al4V, para determinar la distribución de temperatura en una herramienta de corte de carburo no recubierto.

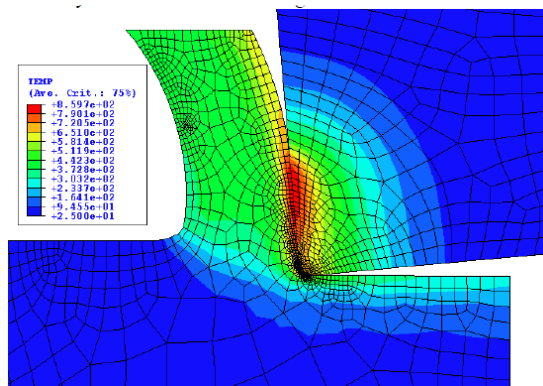


Figura 1.4 Distribución de temperatura en el maquinado del AISI 1045 [16].

Yen y colaboradores [17] desarrollaron una metodología para predecir la evolución del desgaste de la herramienta y su vida útil con simulaciones MEF. La primera parte consistió en un modelo de desgaste entre la herramienta y la pieza a través de la calibración de un conjunto de ensayos de desgaste y de simulaciones numéricas. La segunda parte consistió en realizar modificaciones a los software comerciales MEF para permitir el cálculo del desgaste de la herramienta. Incluyó la validación experimental, utilizando un carburo no recubierto con un radio de filo de 20 μm para el mecanizado del acero AISI 1045 a una velocidad de corte de 300 m/min.

Karpat y Özel [18-21] investigaron la distribución de temperaturas en la superficie de ataque (Figura 1.5). El modelo se probó y validó a través de pruebas experimentales de medición de temperatura del acero AISI 1045 y el aluminio AL 6061-T6, para velocidades de corte hasta 360 m/min con herramientas de carburo.

Ucun y Aslantas [22] determinaron numéricamente los efectos del tipo de recubrimiento en las fuerzas de corte, las tensiones en la herramienta y las temperaturas. La simulación Lagrangiana termo-visco-plástica del acero AISI 4340 fue realizado utilizando dos tipos diferentes de recubrimientos ($\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ y Al_2O_3) con la misma geometría.

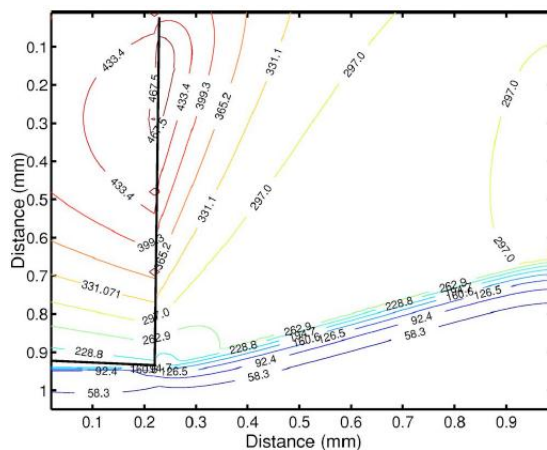


Figura 1.5 Distribución de temperatura del acero AISI 1045 [20].

Las fuerzas de corte simuladas fueron comparadas con las obtenidas experimentalmente, así como la variación de las tensiones en la herramienta y la distribución de temperaturas (Figura 1.6). Los resultados indicaron que la herramienta recubierta con Al_2O_3 mostró mejor comportamiento de la distribución de temperatura debido al incremento de su conductividad térmica. Los resultados numéricos confirman los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Los autores abordan el análisis del mecanizado hasta velocidades de corte de 300 m/min.

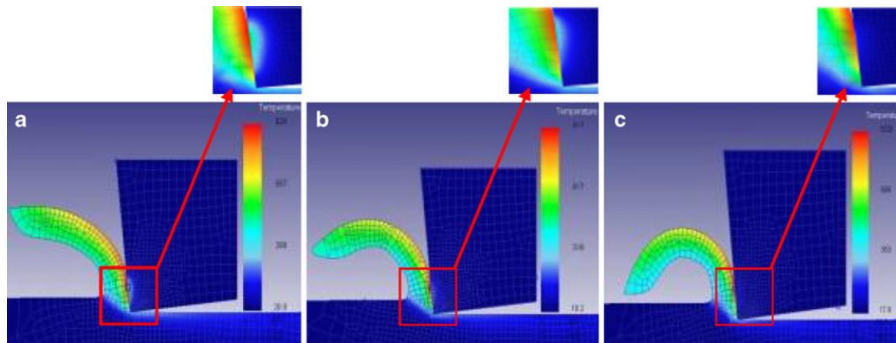


Figura 1.6 Comparación de la distribución de temperaturas (°C) [22].

Bhoyar y Kamble[23] utilizan la simulación por MEF para obtener soluciones que representen las fuerzas de corte, la energía específica de corte y las temperaturas, en diferentes puntos de contacto entre la viruta y la superficie de ataque en el mecanizado del acero EN-24, así como en los substratos de los recubrimientos de la herramienta. Se estudiaron las temperaturas, como aspecto relevante en la modificación de las propiedades de los metales (Figura 1.7) para una velocidad de 158 m/min.

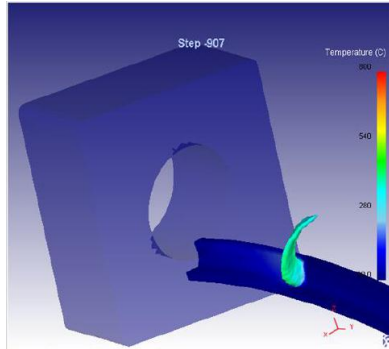


Figura 1.7 Distribución inicial de temperatura en la formación de la viruta [23].

1.4 Caracterización de los software MEF para la simulación del mecanizado.

Es bien conocido que los procesos de mecanizado son aún la técnica de manufactura más utilizada, el estudio del mismo posee gran interés para la industria. A pesar de la experiencia acumulada en esta área, aún muchos de los procesos se ejecutan a través del método del ensayo y el error, incrementando los costos y el tiempo del desarrollo del producto. Debido a esto, se ha investigado de manera intensiva en la modelación MEF de las operaciones de mecanizado, para predecir el desempeño de las herramientas y reducir las pruebas experimentales [24].

En la primera mitad del siglo XX muchos investigadores comenzaron a estudiar el proceso de formación de la viruta utilizando métodos analíticos. Los primeros enfoques analíticos estaban limitados por los valores de algunas variables de corte tales como las fuerzas o aspectos geométricos relacionados con el ángulo de cizallamiento. Con la aparición de la teoría de la plasticidad combinada con el método MEF, las variables de estudio pudieron ser calculadas de manera más precisa, proporcionando un punto de vista diferente en el proceso de formación de la viruta.

En la pasada década, se ha observado un mayor desarrollo de los modelos MEF

de mecanizado en 3D, debido a los avances en las computadoras y en los algoritmos numéricos. Algunos de estos modelos se basan en la formación de la viruta utilizando el criterio de daño o técnicas de remallado automático. A la vez, otros modelos han emergido con la utilización de la formulación ALE (Euleriana y Lagrangiana) en 2D y modelos oblicuos en 3D que sitúan los análisis en una posición más cercana a la práctica industrial de los procesos de mecanizado.

1.4.1 Formulaciones MEF utilizadas en el proceso de mecanizado.

En las últimas tres décadas se ha desarrollado el método de los elementos finitos primero basado en la formulación Euleriana y luego basado en la formulación Lagrangiana para analizar el proceso de corte de metales. La última formulación es una combinación de la Euleriana y la Lagrangiana [25] identifica la existencia de varias técnicas especiales de elementos finitos, tales como elementos de separación, remallado de zonas, modelación de la fricción, etc., implementadas para mejorar la exactitud y eficiencia de la modelación MEF.

En la formulación Euleriana, la malla de elementos finitos se fija espacialmente y el flujo de material se controla por el volumen, lo que elimina la distorsión durante el proceso. Además, se requieren pocos elementos para el análisis, reduciendo el tiempo de cálculo. La desventaja de este método es la necesidad de determinar las fronteras y la forma de la viruta a priori. Además, el espesor de la viruta, la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta y las condiciones de contacto entre ellas deben mantenerse constantes durante el análisis, algo que dista de la realidad [26].

La formulación Lagrangiana se utiliza fundamentalmente en los problemas de mecánica de sólidos. En este caso, la malla de elementos finitos es vinculada al material de la pieza y cubre toda la región de análisis. Esto la hace preferible cuando se estudian flujos de materiales no restringidos. Se utiliza ampliamente en la simulación del corte de metales debido a la habilidad de determinar la geometría de la viruta desde el principio del proceso. Como desventaja de esta formulación, se requiere de un proceso de regeneración del mallado y debe de establecerse el

criterio de separación de la viruta [26].

La formulación ALE es una combinación de las dos anteriores. Por tanto, la malla sigue el flujo del material y el problema se resuelve por los desplazamientos de los pasos de la formulación Lagrangiana, mientras que la malla es reposicionada y el problema es resuelto para las velocidades en los pasos de la formulación Euleriana [26].

1.4.2 Caracterización de los software MEF para el proceso de mecanizado.

La selección del software MEF para el análisis del maquinado es un factor importante en la determinación de la calidad y alcance del análisis que se quiere realizar. Esto es debido a que cada paquete posee diferentes capacidades y resulta crítico seleccionar el paquete con las características apropiadas. Además, los supuestos y las técnicas de resolución utilizados por cada paquete influyen de manera decisiva en los resultados obtenidos [27].

Deform™ (Design Environment for Forming) [27]

Deform™ (Figura 1.8) es un paquete comercial para la modelación MEF de varios procesos de manufactura. Su área original de aplicación fue el conformado de metales, pero se ha ido extendiendo a través de módulos hasta operaciones como el maquinado. Como ventaja, los módulos de maquinado de Deform™ pueden ser utilizados de manera rápida para las operaciones tecnológicas de torneado, fresado y taladrado.

El usuario tiene que proporcionar la geometría de la pieza y de la herramienta, así como los parámetros del proceso. El solver utiliza una configuración estándar y encuentra la solución. Alternativamente, el usuario tiene la posibilidad de ajustar los parámetros del solver tales como el tamaño del mallado, las condiciones de frontera y las propiedades de la interacción pieza-herramienta.

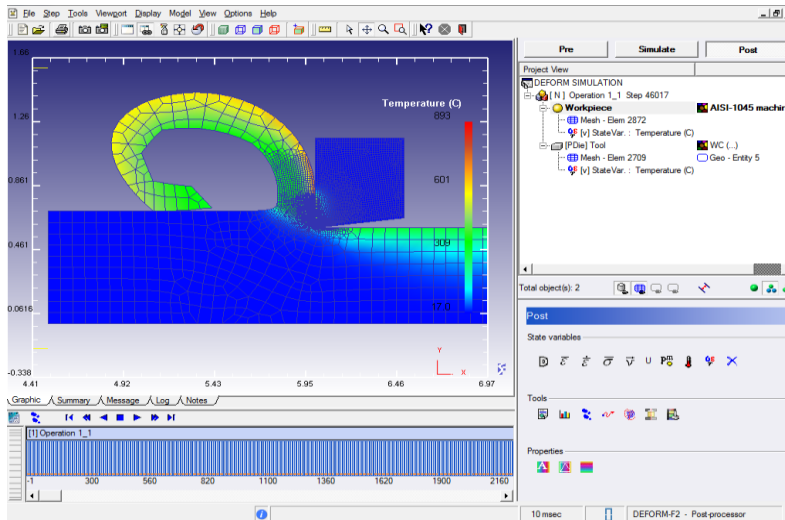


Figura 1.8 Software Deform™ 2D (módulo de mecanizado).

Deform™ posee una extensa biblioteca de materiales que contiene los más comunes y sus aleaciones. El programa tiene la capacidad de definir nuevos materiales basados en los datos de tensión/deformación y otras propiedades. Como desventajas, en Deform™ la pieza tiende a demandar más y más elementos a medida que la simulación progresa, lo que causa que la simulación sea más lenta con el tiempo. Además, la simulación puede parar periódicamente y el tamaño de la malla debe de ajustarse por el usuario.

Abaqus/Explicit™[27]

Abaqus™ es un paquete MEF de propósito general que puede resolver una gran variedad de problemas. No posee un módulo específico para el maquinado, por lo que el usuario deberá de explícitamente definir la herramienta y la pieza (Figura 1.9), los parámetros del proceso y los controles de la simulación. Como ventajas, Abaqus™ posee dos solvers (Standard y Explicit) que puede ser utilizado para una gran variedad de simulaciones. El usuario es libre de modelar la operación de maquinado usando axiomas específicos, proporcionando por tanto, un buen control sobre la simulación.

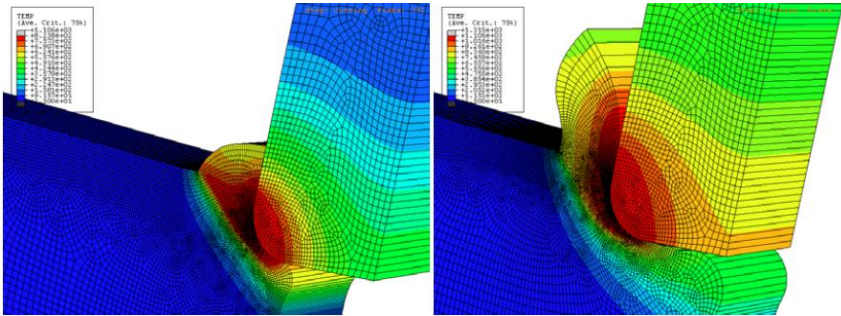


Figura 1.9 Abaqus/Explicit™. Modelación de temperatura (AISI 4340) [28].

Aunque Abaqus™ no posee soporte predefinido para los materiales, permite al usuario configurar los materiales utilizando una variedad de modelos, para el caso específico del corte de metales. El usuario tiene por tanto, un control exhaustivo sobre el mallado y los tipos de elementos utilizados en el modelo. La ventaja más notable de Abaqus™ es que permite la modelación a un alto nivel de detalle. Además, el software es accesible vía línea de comandos y soporta la funcionalidad de los scripts.

Como desventaja más notable, la naturaleza abierta del programa presenta una elevada curva de aprendizaje.

AdvantEdge™[27]

AdvantEdge™ es un paquete MEF específico para el maquinado. Posee módulos pre-programados para las operaciones de maquinado en 2D y 3D, incluyendo el torneado (Figura 1.10), fresado, taladrado, etc.

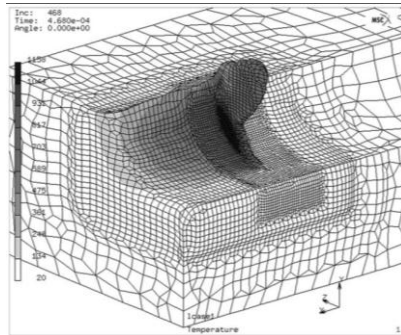


Figura 1.10 Simulación en el torneado con el software AdvantEdge™[29].

Este paquete comercial utiliza un remallado adaptativo para facilitar la calidad y precisión de los resultados, soporta una gran variedad de materiales. El solver es controlado por el propio software y permite realizar simulaciones rápidas. AdvantEdge™ no proporciona mucha flexibilidad en la configuración de los controles del solver.

Conclusiones.

En este capítulo, se llega a la siguiente conclusión:

1. No se identificaron en la revisión bibliográfica realizada, estudios numéricos MEF para evaluar la distribución de temperaturas en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 utilizando las herramientas de corte P10, P15 y P25.

CAPÍTULO 2 SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DEL MECANIZADO DE ALTA VELOCIDAD DEL ACERO AISI 1045.

2.1 Etapas del ciclo de análisis por el método de los elementos finitos.

El ciclo del análisis por elementos finitos incluye cinco etapas diferenciadas, como se puede observar en la Figura 2.1. En la etapa denominada concepto, se debe tener en cuenta los requisitos del problema a analizar. Hay que definir el modelo a incluir para el correcto análisis. La etapa de modelización, es también llamada pre-procesamiento. En este punto se diseña el objeto a analizar, así como las condiciones de contorno.

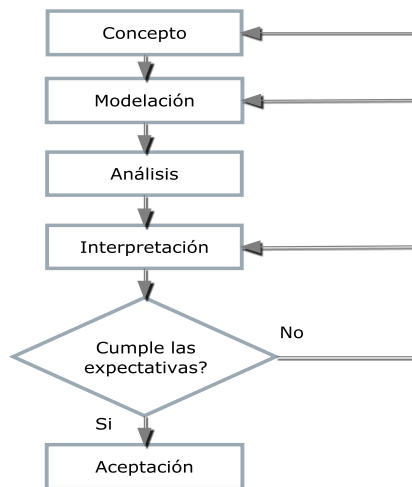


Figura 2.1 Ciclo del análisis por elementos finitos [30].

La etapa de análisis es donde se ejecuta el verdadero cálculo numérico del modelo de elementos finitos. La interpretación es en realidad la etapa más importante, pues es donde se le da forma a los datos obtenidos, se interpreta su significado y se decide si el análisis es admisible o si por el contrario se debe proceder a realizar algún cambio.

Desde esta etapa se puede retornar hasta el concepto, la modelización o incluso hasta una nueva interpretación de los mismos datos. La aceptación es el momento donde se realizan las conclusiones finales obtenidas del análisis e interpretación de los datos obtenidos.

El MEF se implementa a través de un software que minimiza los tiempos dedicados a las iteraciones. En este caso los programas informáticos usados para estos análisis incluyen tres pasos o módulos principales, el pre-procesado, el análisis y el post-procesado.

En el pre-procesado se incluye la definición del problema o el concepto y la modelación. Esta es una parte fundamental, ya que cuantos más parámetros se definan, más veraces serán los resultados obtenidos, pero a su vez el tiempo de cálculo también se incrementa de manera considerable. Dentro del módulo de pre-procesado se incluyen entre otros: diseño de geometrías y mallado, propiedades del material, contactos o rozamientos, condiciones iniciales, condiciones de contorno y adaptación de mallado.

En el análisis o cálculo por elementos finitos, módulo también denominado como solver o "solucionador" es el que realmente realiza la parte iterativa y matemática en la que se basa el Método de Elementos Finitos, pudiéndose hacer los demás pasos mediante otros programas menos especializados (sistemas CAD) o incluso manualmente. En la fase de post-procesado, se procede al estudio de los datos y resultados obtenidos. La mayoría de los programas informáticos basados en el MEF actuales incluyen un post-procesador en el que se muestran gráficamente los resultados, siendo de esta forma más sencilla su interpretación.

Özel desarrolló un método para predecir las fuerzas en el corte, temperatura, las tensiones en la zona primaria y secundaria, la simulación está influenciada por dos factores clave: (1) las variaciones en las propiedades de la pieza mecanizada a diferentes velocidades de corte (dependen del flujo de las tensiones) y (2) las características de fricción entre el material y la herramienta. Estos parámetros son los fundamentales en un análisis puramente mecánico. Sin embargo, para realizar

un análisis mecánico-térmico también habrá que tener en cuenta los siguientes factores: (1) las propiedades térmicas del material a mecanizar y de la herramienta de corte, (2) la geometría de la herramienta de corte, (3) las condiciones de contorno, y (4) los criterios de fractura [15].

2.2 Comportamiento de los materiales y su modelación numérica.

El comportamiento del material se explica mediante la curva de fluencia y la ley de Hooke [8]. 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.

a) Ecuación constitutiva.

Diversos modelos de deformación plástica y visco-plástica están disponibles en los software de simulación. Estos permiten relacionar el estado de tensiones o deformaciones, la temperatura y la velocidad de deformación. Los modelos termo-visco-plásticos se rigen por ecuaciones constitutivas (2.1).

$$\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) \text{ MPa} \quad (2.1)$$

ε : Tensiones efectivas

$\dot{\varepsilon}$: Tasa efectiva de tensión

Como sucede en los modelos de Johnson-Cook (1983), Huang (2002), Poulachon et al. (2001), Zerilli-Armstrong (1987) y Hamouda (2002) entre otros [20].

Este estudio considera el modelo de Johnson-Cook para el acero AISI 1045 adaptado de Jaspers y Dautzenberg [31]. El modelo de Johnson-Cook del material describe el flujo de la deformación del material considerando la tensión o esfuerzo,

la razón del esfuerzo y los efectos de la temperatura, tal y como muestra la ecuación (2.2).

$$\bar{\sigma} = \left[A + B(\bar{\varepsilon})^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T_p - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \text{MPa} \quad (2.2)$$

Las constantes empíricas que determinan el comportamiento del material son A, B, C, n, m, T_m, T_p y T₀. El valor de la constante A (MPa) representa el límite elástico, mientras que B (MPa) es el módulo de endurecimiento, C es un coeficiente relativo a la sensibilidad a la deformación plástica, n es el coeficiente de acritud o sensibilidad a la deformación plástica, m es el coeficiente de ablandamiento térmico, T_m temperatura de fusión, T₀ a temperatura ambiente y T_p es la temperatura de la pieza (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Coeficientes para el modelo de Johnson-Cook (AISI 1045) [31].

Material	T _m (°C)	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
AISI 1045	1460	553.1	600.8	0.0134	0.234	1

El primer grupo de la ecuación corresponde al término elástico-plástico, el segundo corresponde a la componente de viscosidad debido a la velocidad de deformación y el tercer grupo de la ecuación (2.4) corresponde al efecto de la temperatura.

2.3 Modelación numérica del mecanizado con el software DEFORM/2D™.

El software DEFORM-2D™ utiliza la simulación termo-mecánica acoplada con la modelación elasto-plástica del material a elaborar. La Figura 2.2 muestra la modelación del corte ortogonal en DEFORM-2D™.

El software es capaz de controlar el remallado en función de las condiciones de frontera definidas para la pieza. Por tanto, los nodos de la frontera del lado izquierdo están fijos en la dirección del eje X, mientras que los nodos de la parte

inferior se mantienen fijos en la dirección Y.

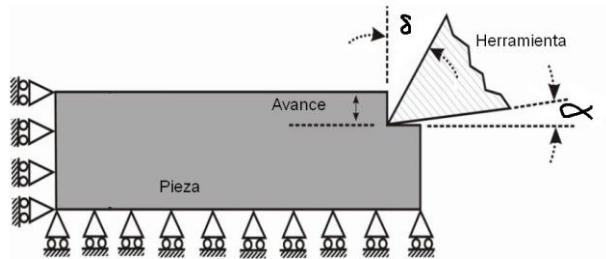


Figura 2.2 Modelación en DEFORM-2D™ (adaptado de [25]).

Las condiciones de frontera térmicas se definen para facilitar la modelación termo mecánica de las soluciones. Las principales condiciones de frontera son: (1) el calor se genera debido a la deformación plástica de la pieza mientras la herramienta penetra en el material, asumiendo que el 90% de todo el trabajo de deformación plástica se convierte en calor (2.3); (2) el calor generado se debe a la fricción entre la herramienta y la viruta (2.4) y (3) la pieza emite calor al entorno (2.5).

$$Q_R = \frac{M \times f_Q \times W^p}{\rho} \text{ (W)} \quad (2.3)$$

$$q_f = F_{fr} \times V_r \times M \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.4)$$

$$q_c = h \times (T_w - T_0) \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.5)$$

F_{fr} : Fuerza de fricción.

V_r : Velocidad de deslizamiento relativa entre la herramienta y la viruta.

M : Equivalente mecánico del calor.

w_p : Tasa de trabajo plástico.

f : La parte del trabajo de deformación plástico convertido en calor.

ρ : La densidad.

2.3.1 Modelación de las condiciones generales en el pre-proceso.

Antes de comenzar la definición de los elementos constitutivos del proceso de corte ortogonal a simular (módulo de mecanizado), se necesita introducir una serie de parámetros generales del proceso de corte, como se expresa en la Figura 2.3. La velocidad de corte puede introducirse como la velocidad rotacional del diámetro exterior de la pieza o introduciendo la velocidad de rotación del husillo y el diámetro de la pieza a maquinar. En el caso de la interface entre la herramienta y la pieza, se introduce el factor de fricción al cizallamiento y el coeficiente de transferencia de calor.

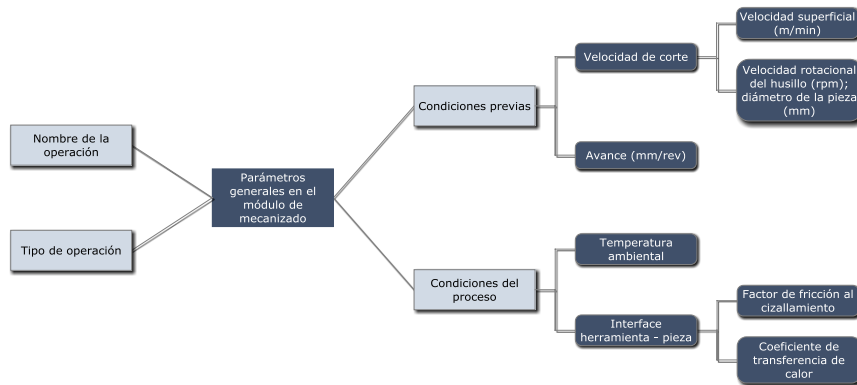


Figura 2.3 Parámetros generales a definir en el módulo de mecanizado [30].

Una vez definidos estos parámetros, se pasa a la introducción de los datos referidos a la modelación de la herramienta de corte. El primero de los aspectos a definir es la geometría en 2D de la herramienta. Una vez seleccionado el tipo de geometría de herramienta, si es nueva, se tienen que facilitar los datos geométricos necesarios, entre los que se incluyen las longitudes, los ángulos de ataque y de incidencia, así como el radio entre flancos. En caso de que la herramienta posea capas de recubrimientos, se define el número de capas, el material de cada capa y el espesor en micrómetros. El mallado de la herramienta se define en función de la exactitud numérica, DEFORM™ define un mallado más exacto para la punta de la herramienta y uno más espaciado para el resto de la

misma.

La definición del material base de la herramienta se realiza a partir de su selección de una base de datos, o puede crearse un material nuevo que luego puede añadirse a la base de datos. DEFORM 2D™ incluye una abundante base de datos de materiales con todas sus propiedades. La definición de las condiciones de frontera para la herramienta de corte se limita al intercambio de calor con el entorno y la temperatura a la que comienza el proceso de corte (temperatura ambiente).

Una vez definidos los materiales y la geometría de la herramienta, se procede al mallado de la misma. Para este paso, el software dispone de una opción de mallado zonal muy útil porque permite mallar de manera diferente por medio de zonas, en función de la proximidad previsible entre la plaquita y la pieza a mecanizar durante la simulación del proceso de corte. Cuanto mayor sea la densidad del mallado, el tiempo de simulación y la complejidad del cálculo aumentan.

Finalizada la definición de los parámetros de la herramienta de corte, se procede a la configuración de la pieza a mecanizar. A continuación se proceden a definir las propiedades del material de la pieza. El procedimiento es similar al explicado para el caso de los materiales de las herramientas de corte. Se puede seleccionar un material de la base de datos o generar uno propio, y también importar materiales que ya existan en otros trabajos realizados previamente.

Después de implementar la ecuación constitutiva del material (al seleccionar o crear el material de la pieza), el paso siguiente es la definición de las propiedades y parámetros de la pieza. Se realiza el mallado, siguiendo la metodología descrita anteriormente para la herramienta de corte, con el manejo de las ventanas que permiten mallar con diferentes densidades.

A partir de este punto, el proceso de simulación está listo para comenzar el análisis, aunque previamente se deben definir los controles de simulación. Este es

un paso importante para la obtención de buenos resultados y mejorar parámetros y formas de cálculo del simulador.

En esta parte del proceso de simulación, se muestran todos los resultados producto de la simulación (Figura 2.4). En la misma se observa la deformación paso a paso, dando la opción de pararla cuando sea oportuno y observar los parámetros concretos. Se puede disponer del entorno gráfico del simulador y obtener gráficas de deformación, tensiones, temperaturas y demás variables del sistema.

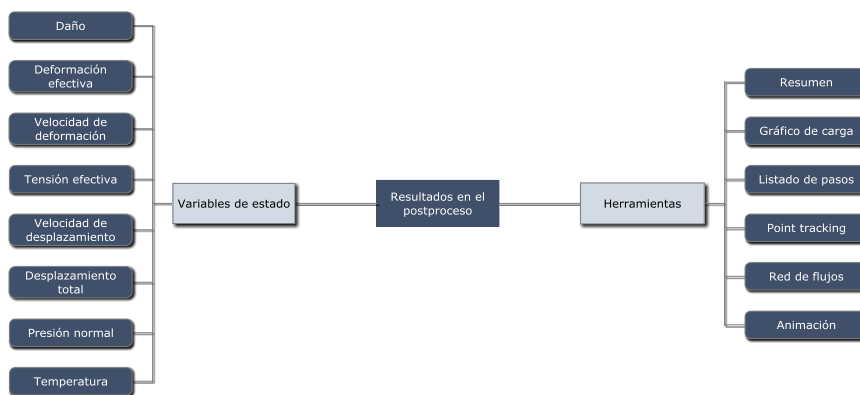


Figura 2.4 Opciones en el post-proceso [30].

El entorno gráfico de la pantalla de post-proceso está dividido en tres partes fundamentales. Por un lado está la zona de visualización en la que se puede observar la simulación de manera dinámica. En la parte superior derecha de la pantalla se encuentran las características del modelo y en la parte inferior derecha se encuentran las disponibilidades de obtención y disposición de la información a través de gráficas y del histórico de la simulación.

Los datos de salida de la simulación se pueden obtener de formas gráficas. Se puede obtener una visualización por pantalla de la secuencia de pasos dinámica que muestra el avance del proceso en forma de video. En la pestaña de herramientas se pueden obtener resultados en forma de diversas gráficas.

2.3.2 Base de la simulación numérica (HSM, acero AISI 1045).[32]

La investigación tomada como referencia para la simulación numérica consistió en determinar la progresión del desgaste del comportamiento de los flanco de tres insertos (Cermet CT5015 sin recubrimiento y carburos recubiertos GC4215 y GC4225) ante el aumento de la temperatura durante el torneado en seco del acero AISI 1045 variando los límites de la velocidad de corte y del tiempo de maquinado. Se establecieron tres niveles de velocidades de corte: (a) moderada a 400 m/min, (b) intermedia a 500 m/min y (c) alta a 600 m/min.

La pieza se montó entre plato y punto. La profundidad de corte ($a = 0.5$ mm) y el avance ($f = 0.1$ mm/r) se mantuvieron constantes durante todas las pruebas.

Como insertos fueron utilizados el cermet sin recubrimiento CT5015-P10 y los metales duros recubiertos CVD GC4215-P15 y GC4225-P25, con marcación SANDVIK (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Características de los insertos.

Inserto	Recubrimientos				Substratos				
	Primera capa	Segunda capa	Tercera	Espesor (μm)	W	Ti	Co	Nb	Al ₂ O ₃
	CT5015-P10	-	-	-	-	20,68	47,20	17,71	8,71
GC4215-P15	TiN	Al ₂ O ₃	Ti(N,C)	15	96,19	1,44	2,38	-	-
GC4225-P25	Ti(C,N)	Al ₂ O ₃	-	10	94,77	2,10	3,13	-	-

Con formato: Espacio Antes: 0 pto, Después: 0 pto

La geometría seleccionada para los tres insertos fue CCMT 12 04 04-PF, la cual presenta rompevirutas. Esta plaquita es rómbica de 80° positiva, con un ángulo de incidencia $\alpha = 7^\circ$, espesor $s = 4 \pm 0.13$ mm, círculo inscrito $iC = 12,7 \pm 0.05$ mm y tolerancias de ± 0.08 mm para iW . Es una plaquita tipo T, con una longitud de la arista de corte $l = 12$ mm, radio de la punta $r\epsilon = 0,4$ mm [6].

Las plaquitas fueron colocadas sobre un portaherramientas marca SANDVIK de referencia SCLCR/L 2020K 12. Los ángulos son los siguientes: ángulo de posición principal del filo de corte $\phi = 95^\circ$, un ángulo de ataque $\gamma = 0^\circ$, ángulo de incidencia principal $\alpha = 7^\circ$ y ángulo de inclinación del borde cortante principal $\lambda = 0^\circ$ [6].

Se utilizó como material para simulación las probetas el acero al carbono AISI 1045 (sin tratamiento térmico) obtenido por los procesos de fundición y laminado en caliente, de gran aplicación a nivel mundial en la fabricación de elementos para la industria metalmecánica e industria automotriz [32].

2.3.3 Modelo en dos dimensiones por el método de los elementos finitos del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045.

Siguiendo los pasos establecidos en el capítulo anterior, se realizó el modelo numérico bidimensional en DEFORM 2D™ (Figura 2.5). El modelo consta de una plaquita rígida (restringida en movimiento en los dos ejes) y de una pieza con características de deformación plástica a mecanizar, de forma rectangular a la que se le asignará la velocidad en dirección del eje X.

Como se puede apreciar, el modelo dispone de un mallado más denso en la zona de contacto entre la plaquita y la pieza, mientras que el mallado del resto de la pieza es mucho menos denso. En total la pieza dispone de 2872 elementos de mallado, mientras que la plaquita está mallada con 2709 elementos. La plaquita, al ser rígida, no sufrirá remallado y siempre conservará la totalidad de sus elementos, por otra parte la pieza será- constantemente remallada al tener en sus propiedades la posibilidad de deformarse.

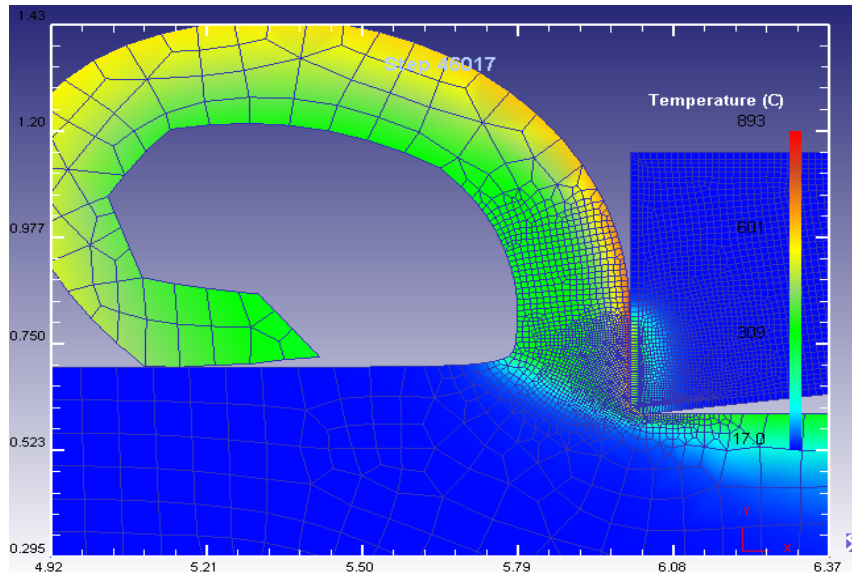


Figura 2.5 Modelo de corte ortogonal generado en DEFORM 2D™.

El material asignado a la pieza es el acero AISI 1045. El material modelado para la plaquita serán los expresados en la Tabla 2.2. La velocidad de corte será uno de los parámetros de variabilidad de los modelos (400 m/min, 500 m/min, 600 m/min), la profundidad de pasada en este modelo queda oculta por estar en el plano Z (fija a 0.5 mm), la tercera dimensión no está divisada en el estudio bidimensional. Sin embargo el avance es una variable fija, 0.1 mm/r.

En los resultados se comprobará específicamente la influencia de la velocidad de corte en el modelo bidimensional del mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 para los calzos (P10, P15, P25). El remallado se ha realizado de manera que cuando se produzca una penetración de un elemento sobre otro de valor superior a 0.0014 mm el software realizará mallado.

En la Tabla 2.3 se muestra las variables numéricas consideradas para la simulación en esta tesis. El formato de cada corrida de la simulación numérica es γ : ángulo de ataque; R: radio del filo; α : ángulo de incidencia; velocidad de corte

en m/min: 400, 500 y 600; e insertos estudiados: P10, P15 y P25.

Tabla 2.3 Variables consideradas en la simulación numérica.

Velocidad de corte (m/min)	Zona de estudio	P10	P15	P25
400	Ataque	γ -400.P10	γ -400. P15	γ -400.P25
	Radio del filo	R-400.P10	R-400. P15	R-400. P25
	Incidencia	α -400.P10	α -400. P15	α -400. P25
500	Ataque	γ -500.P10	γ -500. P15	γ -500. P25
	Radio del filo	R-500.P10	R-500. P15	R-500. P25
	Incidencia	α -500.P10	α -500. P15	α -500. P25
600	Ataque	γ -600.P10	γ -600. P15	γ -600. P25
	Radio del filo	R-600.P10	R-600. P15	R-600. P25
	Incidencia	α -600.P10	α -600. P15	α -600. P25

La temperatura de la herramienta de corte se analizará en función de tres zonas: la zona definida por el ángulo de ataque, la zona definida por el radio de filo y la zona definida por el ángulo de incidencia.

En la Figura 2.6 se muestra la discretización de la herramienta de corte y la zonificación de la misma en función de los criterios citados. Los puntos desde P1 hasta P20 corresponden a la superficie de ataque de la herramienta de corte, de los puntos P21 al P28 corresponden al radio de filo y del P29 al P32 a la superficie de incidencia.

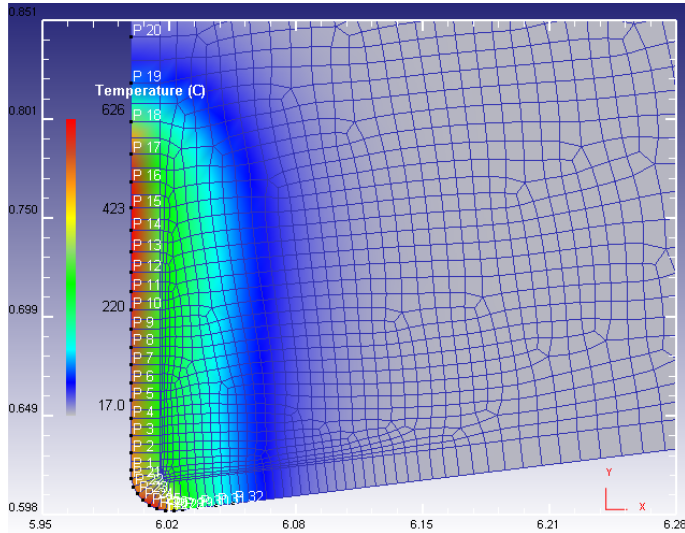


Figura 2.6Discretización de la herramienta de corte por zonas.

2.4 Modelación numérica de la temperatura en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045.

La modelación numérica de la distribución de temperatura en el mecanizado de alta velocidad del acero AISI 1045 se realizó según lo expuesto anteriormente. Una vez que se simula el proceso, se obtiene para cada ensayo numérico realizado una distribución de temperaturas para cada uno de los puntos discretizados en el modelo numérico de la herramienta de corte, como se muestra en la Figura 2.7.

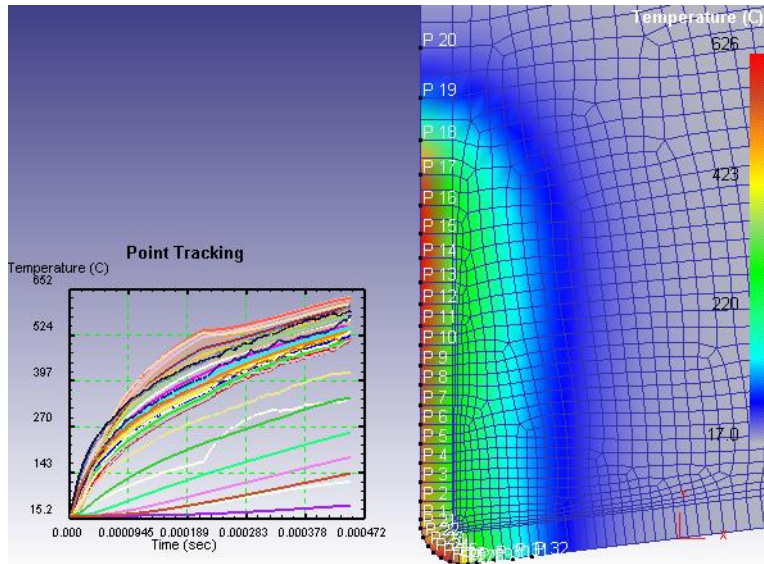


Figura 2.7 Comportamiento en general de la temperatura en los puntos discretizados.

2.4.1 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P10.

En la Figura 2.8 se muestra la distribución de temperatura para la superficie de ataque (T_{sa}) de la herramienta P10 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. Este resultado permite obtener la media de la distribución de temperatura en los distintos puntos de las superficies de la herramienta, y por tanto, disponer de la ecuación de ajuste que describe el comportamiento de esta superficie. En este caso, se obtuvo la ecuación (2.6) con una polinómica de cuarto grado con $R^2 = 0.9991$.

$$T_{sa} = -3E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 22.284 \quad (2.6)$$

En la Figura 2.9 se muestra la distribución de temperatura para la zona del radio del filo de la herramienta (T_{rf}) P10 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. En este caso, se obtuvo la ecuación (2.7) (describe el comportamiento de la superficie) con $R^2 = 0,9987$.

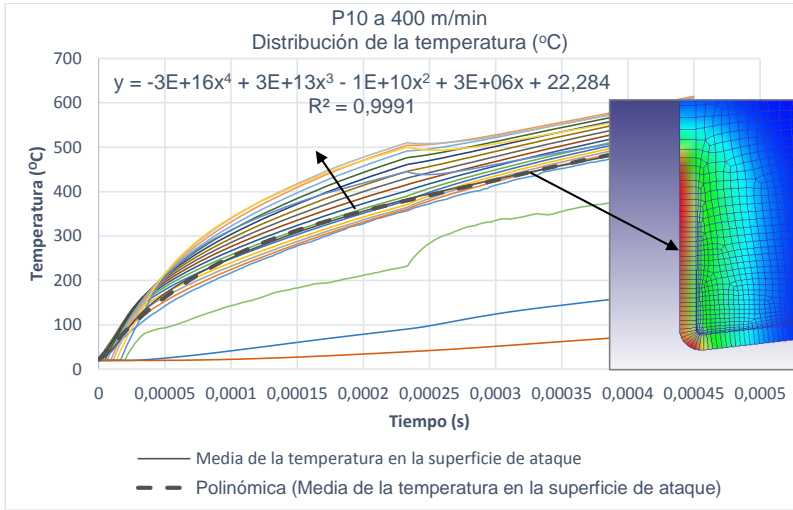


Figura 2.8 Temperatura de la superficie de ataque (P10 a 400 m/min).

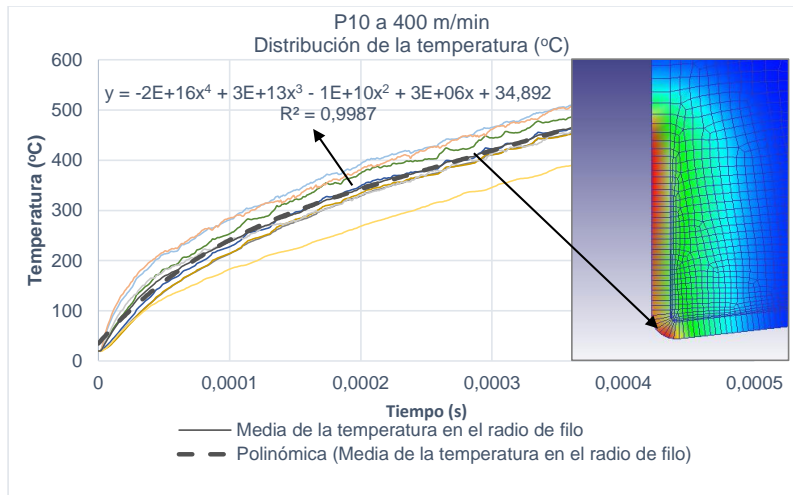


Figura 2.9 Distribución de la temperatura en el radio del filo (P10 a 400 m/min).

$$T_{rf} = -2E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 34,892 \quad (2.7)$$

En la Figura 2.10 se muestra la distribución de temperatura para la zona de la superficie de incidencia de la herramienta P10 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min.

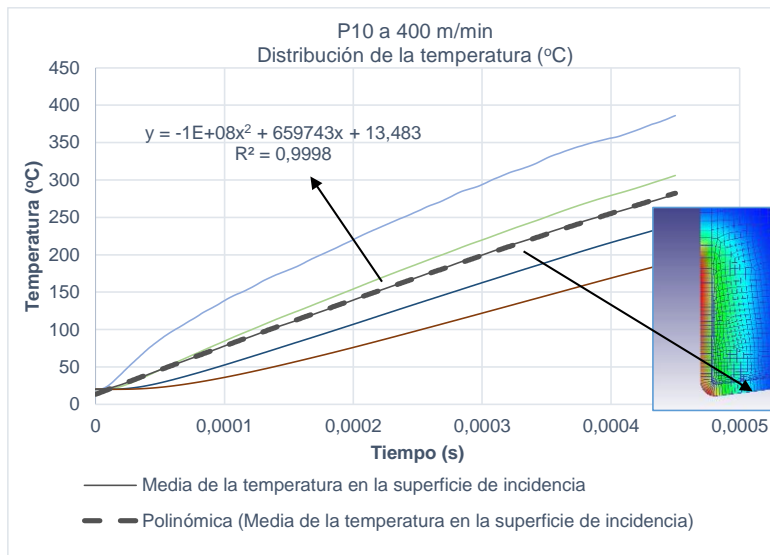


Figura 2.10 Distribución de temperatura en la superficie de incidencia (P10 a 400 m/min).

Se obtiene la curva que representa la media de la distribución de temperatura en la superficie de incidencia (T_{si}) de la herramienta. Para la superficie de incidencia se obtuvo la ecuación (2.8) que describe una curva polinómica de segundo orden con una aproximación de $R^2 = 0.9998$.

$$T_{si} = -1E+08x^2 + 659743x + 13.483 \quad (2.8)$$

En la Figura 2.11 se aprecia una gráfica de resumen con las ecuaciones de regresión lineal para cada superficie a partir de la temperatura media en cada superficie discretizada, para el caso del P10 a 400 m/min.

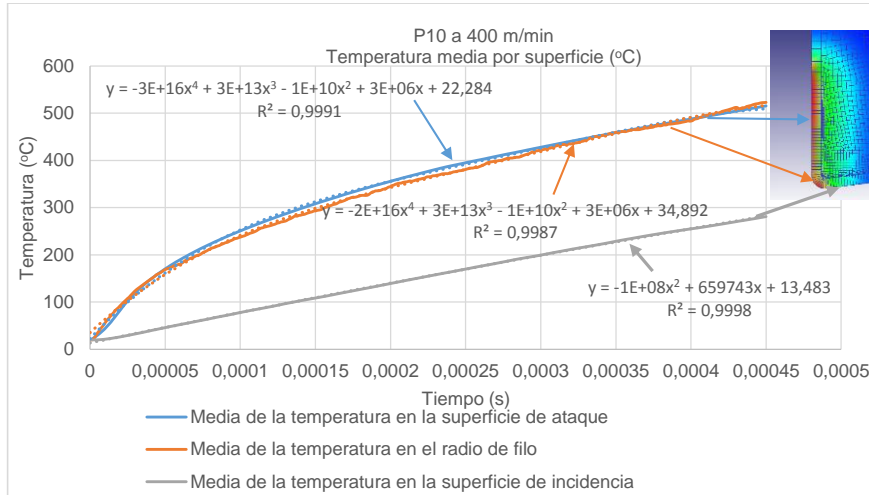


Figura 2.11 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P10 a 400 m/min).

Se observa similitud entre las curvas medias de temperatura de la superficie de ataque y del radio de filo de la herramienta P10 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. Para una mayor diferenciación entre las curvas que poseen similitud, se deberán realizar simulaciones con un mayor número de iteraciones y de pasos.

Siguiendo el mismo procedimiento descrito, se obtuvo el análisis de la distribución de temperatura con el inserto P10 para las velocidades de 500 m/min y 600 m/min (Figuras 2.12 y 2.13). Para el caso del estudio a 500 m/min se obtienen las curvas de ajuste pertenecientes a las superficies discretizadas, para las superficies de ataque (2.9) con un $R^2 = 0.9993$, del radio del filo (2.10) con un $R^2 = 0.9988$, y una polinómica de segundo orden para la superficie de incidencia (2.11) con un $R^2 = 0.9999$.

$$T_{sa} = -6E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 16.042 \quad (2.9)$$

$$T_{rf} = -6E+16x^4 + 5E+13x^3 - 2E+10x^2 + 3E+06x + 28.606 \quad (2.10)$$

$$T_{si} = -9E+14x^4 + 2E+11x^3 + 2E+07x^2 + 616592x + 15.307 \quad (2.11)$$

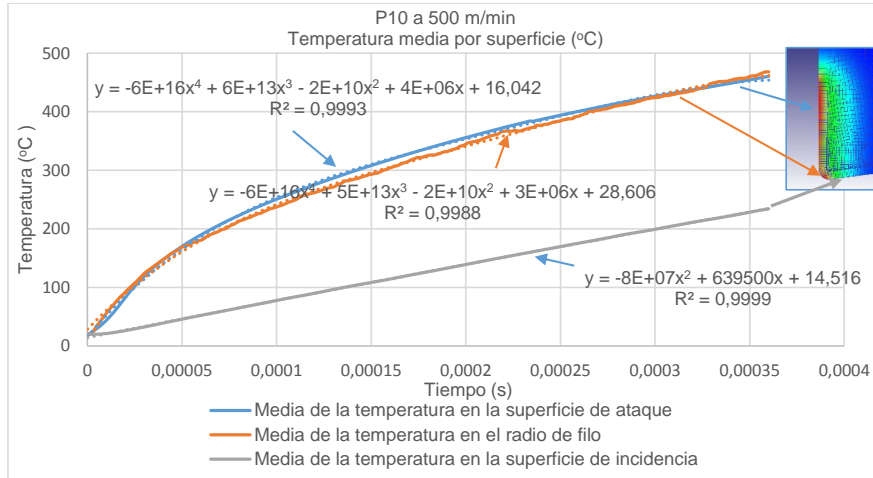


Figura 2.12 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P10 a 500 m/min).

Para el caso del estudio a P10 a 600 m/min se obtienen las curvas de ajuste para las superficies discretizadas (Figura 2.13), para la superficie de ataque (2.12) con un $R^2 = 0.9995$, para el radio del filo (2.13) con un $R^2 = 0.9991$, y para la superficie de incidencia (2.14) con un $R^2 = 0.9999$, similares al estudio a 500 m/min.

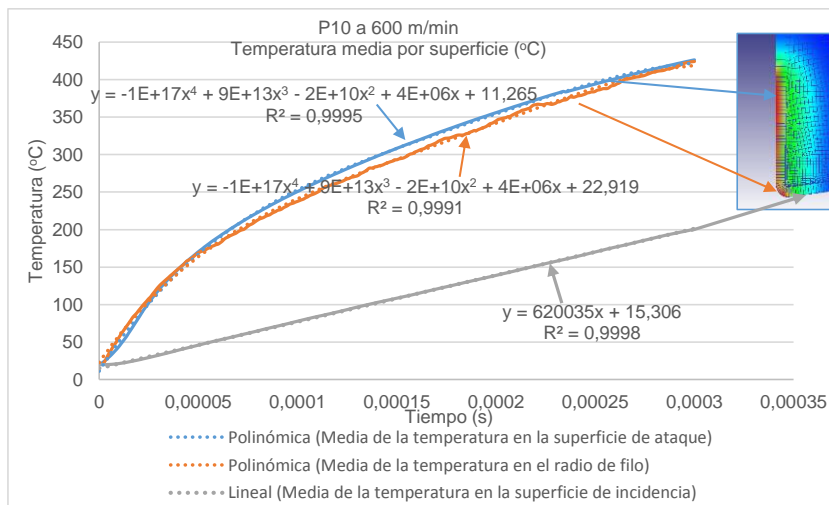


Figura 2.13 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P10 a 600 m/min).

$$T_{sa} = -1E+17x^4 + 9E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 11.265 \quad (2.12)$$

$$T_{rf} = -1E+17x^4 + 9E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 22.919 \quad (2.13)$$

$$T_{si} = 8E+15x^4 - 5E+12x^3 + 9E+08x^2 + 560855x + 16.042 \quad (2.14)$$

2.4.2 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P15.

En la Figura 2.14 se muestra la distribución de temperatura en la superficie de ataque de la herramienta P15 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. De esta forma se obtiene la media de la distribución de temperatura en la superficie de ataque de la herramienta. Se obtuvo la ecuación (2.15) con una polinómica de cuarto orden con un $R^2 = 0.9997$.

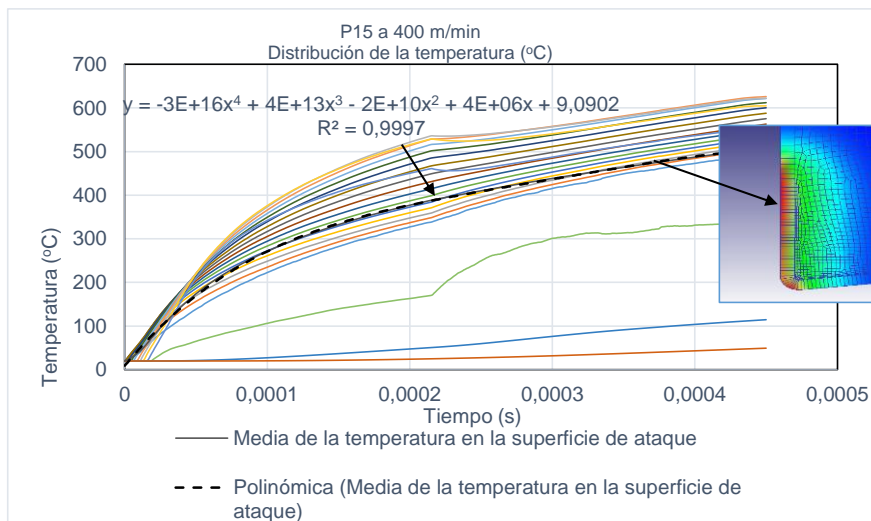


Figura 2.14 Temperatura en la superficie de ataque (P15 a 400m/min).

Se observa un comportamiento numérico similar al que se obtuvo con la ecuación para el inserto P10 a una velocidad de corte de 400 m/min. Es decir, se observa que para ambos insertos (P10 y P15) a la velocidad de corte de 400 m/min manteniendo los demás parámetros iguales, la simulación numérica refleja un comportamiento similar de la temperatura en la superficie de ataque.

$$T_{sa} = -3E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 9.0902 \quad (2.15)$$

En la Figura 2.15 se muestra la distribución de temperatura para la zona del radio del filo de la herramienta P15 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. Este resultado permite obtener la media de la distribución de temperatura en el radio de filo de la herramienta, y por tanto, disponer de la ecuación de ajuste para poder predecir este comportamiento (2.16) con un $R^2 = 0.9992$.

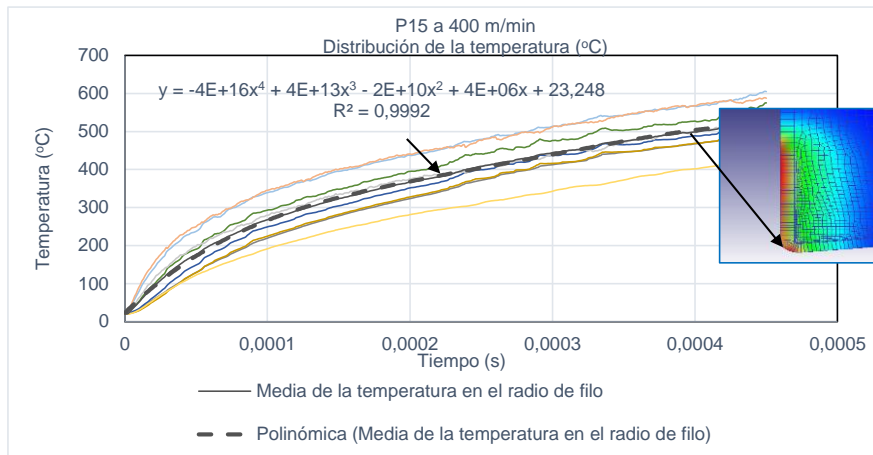


Figura 2.15 Distribución de temperatura radio del filo (P15 a 400 m/min).

$$T_{rf} = -4E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 23.248 \quad (2.16)$$

En la Figura 2.16 se muestra la distribución de temperatura para la zona de la superficie de incidencia de la herramienta P15 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. Se obtiene la media de la distribución de temperatura en la superficie de incidencia de la herramienta, y por tanto, se dispone de la ecuación de ajuste para poder predecir este comportamiento (2.17) con un $R^2 = 0.999$

$$T_{si} = 484793x + 16.324 \quad (2.17)$$

Al igual que ocurrió en la simulación numérica del mecanizado con el inserto P10, para el caso del inserto P15 se observa similitud entre las dos curvas medias de temperatura de la superficie de ataque y del radio de filo de la herramienta al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min.

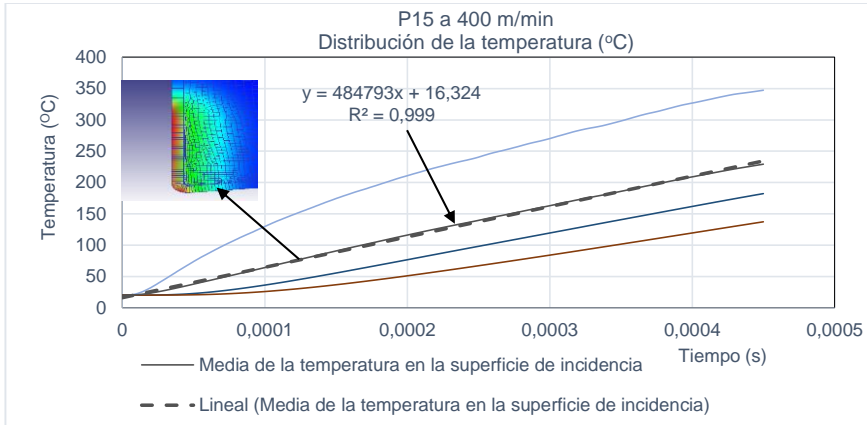


Figura 2.16 Temperatura en la superficie de incidencia (P15 a 400 m/min).

En la Figura 2.17 se muestra una gráfica resumen con las ecuaciones de ajuste para cada superficie a partir de la temperatura media para el caso del inserto P15 a 400 m/min. Para la superficie de ataque se obtuvo la ecuación (2.18) con un $R^2 = 0.9997$, para la superficie del radio del filo la ecuación (2.19) con un $R^2 = 0.9992$ y para la superficie de incidencia la ecuación (2.20) con un $R^2 = 0.999$.

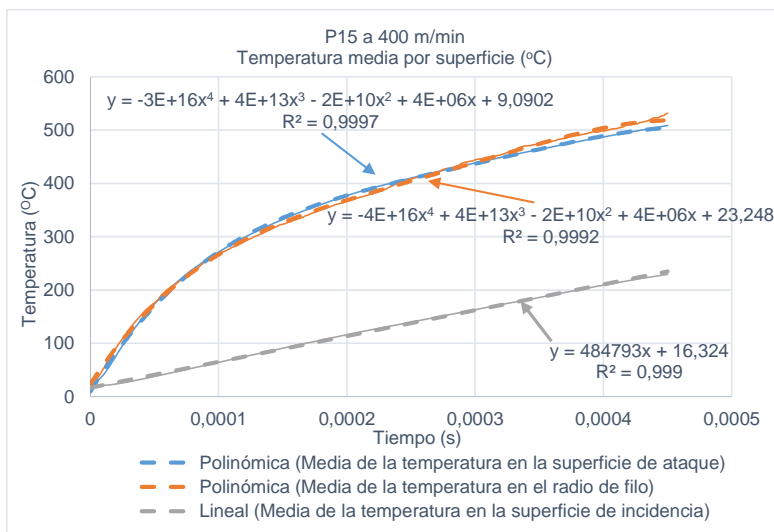


Figura 2.17 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P15 a 400 m/min).

$$T_{sa} = -3E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 9.0902 \quad (2.18)$$

$$T_{rf} = -4E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 23.248 \quad (2.19)$$

$$T_{si} = 484793x + 16.324 \quad (2.20)$$

Siguiendo el mismo modo de representación, se obtuvo el análisis de la distribución de temperatura con el inserto P15 para las velocidades de 500 m/min y 600 m/min (Figuras 2.18 y 2.19).

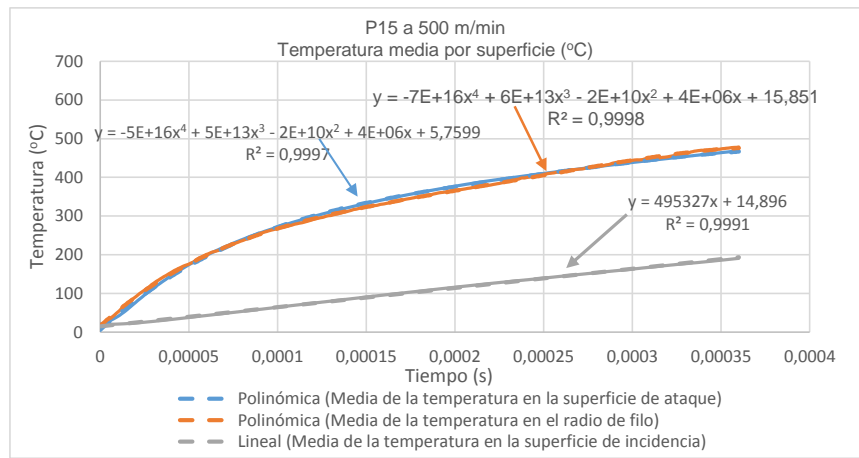


Figura 2.18 Ecuación de ajuste para cada superficie (P15 a 500 m/min).

Se observa que para el caso del estudio a 500 m/min se obtienen las curvas de ajuste para las superficies discretizadas, una polinómica de cuarto orden para las superficies de ataque (2.21) con un $R^2 = 0.9997$, del radio del filo (2.22) con un $R^2 = 0.9998$ y una ecuación de ajuste lineal para la superficie de incidencia (2.23) con un $R^2 = 0,9991$.

$$T_{sa} = -5E+16x^4 + 5E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 5.7599 \quad (2.21)$$

$$T_{rf} = -7E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 15.851 \quad (2.22)$$

$$T_{si} = 495327x + 14.896 \quad (2.23)$$

En la Figura 2.19 se muestra una gráfica resumen con las ecuaciones de ajuste para cada superficie a partir de discretizar la temperatura media en cada superficie estudiada en la superficie de la herramienta de corte, para el caso del inserto P15 a 600 m/min.

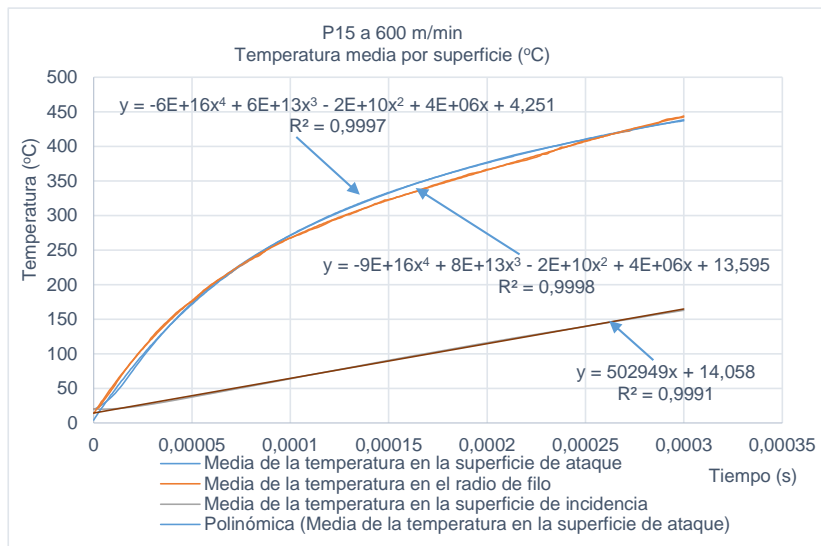


Figura 2.19 Ecuación de ajuste para cada superficie (P15 a 600 m/min).

La temperatura media en la superficie de ataque se representa por la ecuación (2.24) con un $R^2=0.9997$, en el radio del filo se representa en la gráfica a través de la ecuación (2.25) con un $R^2=0.9998$, y en la superficie de incidencia, se expresa por la ecuación (2.26) con un $R^2=0.9991$.

$$T_{sa} = 6E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 4.251 \quad (2.24)$$

$$T_{rf} = -9E+16x^4 + 8E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 13.595 \quad (2.25)$$

$$T_{si} = 502949x + 14.058 \quad (2.26)$$

2.4.3 Distribución de temperatura en el mecanizado con el inserto P25.

En la Figura 2.20 se presenta la distribución de temperatura para la zona de la superficie de ataque de la herramienta P25 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min.

De esta forma se obtiene la media de la distribución de temperatura en la superficie de ataque de la herramienta, y por tanto, la ecuación de ajuste para poder predecir el comportamiento del proceso. Se obtuvo la ecuación (2.27) con una polinómica de cuarto grado con una aproximación a la curva real de $R^2 = 0.9991$.

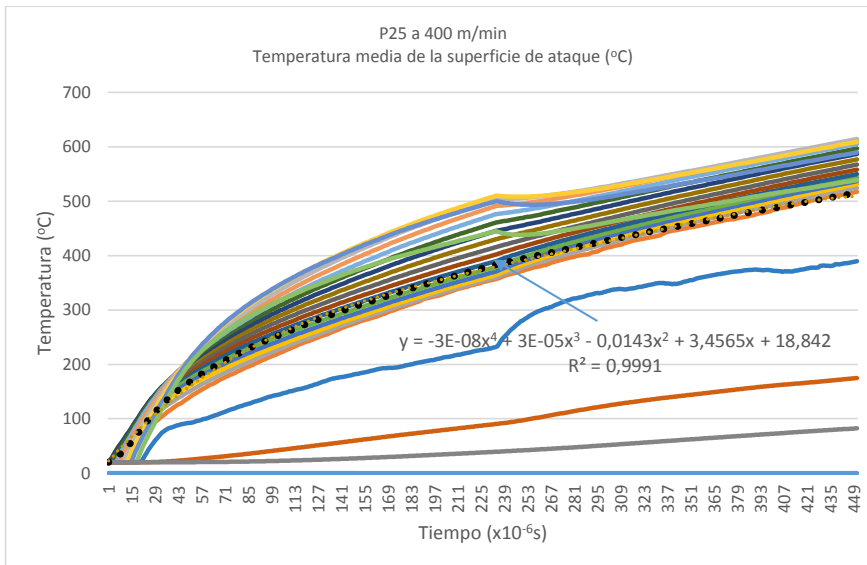


Figura 2.20 Temperatura en la superficie de ataque (P25 a 400 m/min).

$$T_{sa} = -3E-08x^4 + 3E-05x^3 - 0.0143x^2 + 3.4565x + 18.842 \quad (2.27)$$

En la Figura 2.21 se muestra la distribución de temperatura para la zona del radio del filo de la herramienta P25 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min.

Mediante la distribución de temperatura se obtiene la media de dicha distribución en el radio de filo de la herramienta, al igual que con la distribución anterior, se obtiene la ecuación que describe este comportamiento (2.28) con una polinómica

de grado cuatro con $R^2 = 0.9987$.

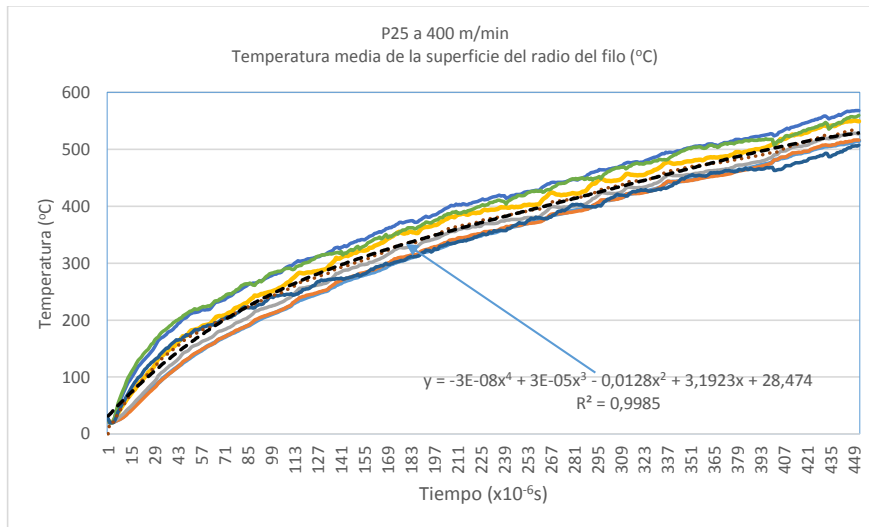


Figura 2.21 Distribución de temperatura del radio del filo (P25 a 400 m/min).

$$T_{rf} = -2E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 34.892 \quad (2.28)$$

En la Figura 2.22 se muestra la distribución de temperatura para la zona de la superficie de incidencia de la herramienta P25 al mecanizar el acero AISI 1045 a 400 m/min. Se obtiene la media de la distribución de temperatura en la superficie de incidencia de la herramienta, y por tanto, se dispone de la ecuación de ajuste para poder predecir este comportamiento (2.29) con $R^2 = 0.9991$.

$$T_{si} = 597602x + 18.133 \quad (2.29)$$

La Figura 2.23 muestra las curvas a modo de resumen, con las ecuaciones de ajuste para cada superficie a partir de la temperatura media, para el caso del inserto P25 a 400 m/min.

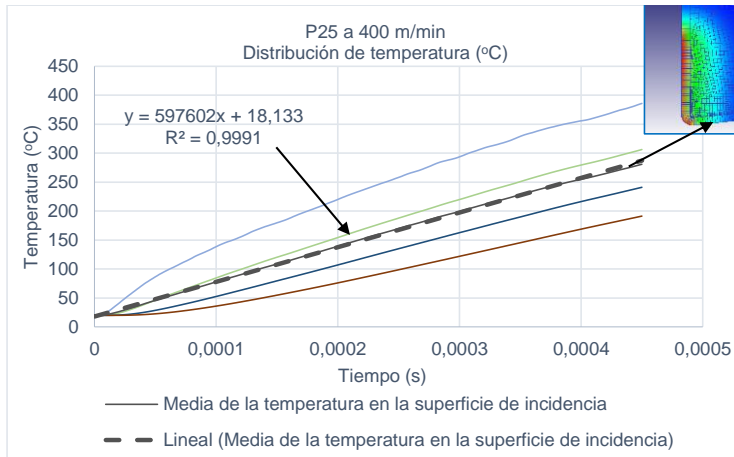


Figura 2.22 Temperatura de la superficie de incidencia (P25 a 400 m/min).

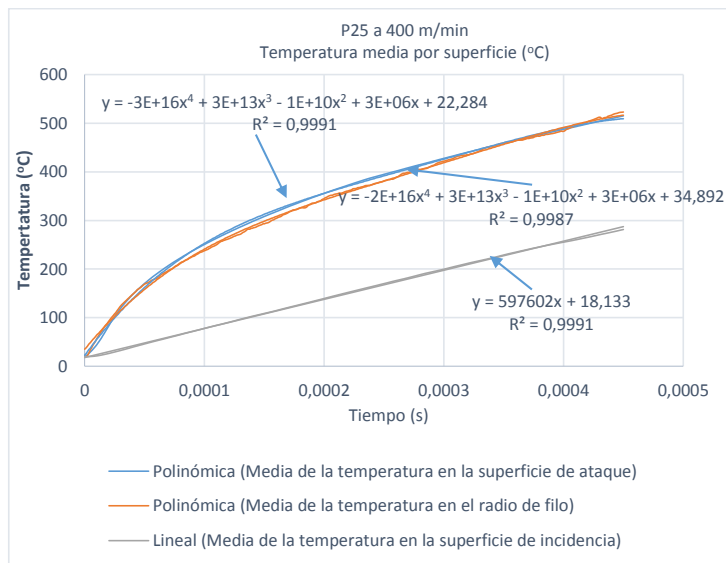


Figura 2.23 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P25 a 400 m/min).

Continuando con el mismo procedimiento descrito, se procedió a obtener las curvas de distribución de temperatura del inserto P25 para las velocidades de 500 m/min y 600 m/min (Figuras 2.24 y 2.25), así como sus respectivas ecuaciones de ajuste.

El inserto P25 a 500 m/min arrojó las curvas de ajuste para las superficies discretizadas, una polinómica de tercer orden para las superficies de ataque y del radio del filo, y una ecuación de ajuste lineal para la superficie de incidencia.

Para el caso del estudio a 600 m/min se obtienen las curvas de ajuste para las superficies discretizadas (Figura 2.25), una polinómica de cuarto orden para las superficies de ataque y del radio del filo, y una ecuación de ajuste lineal para la superficie de incidencia, similares al estudio a 500 m/min.

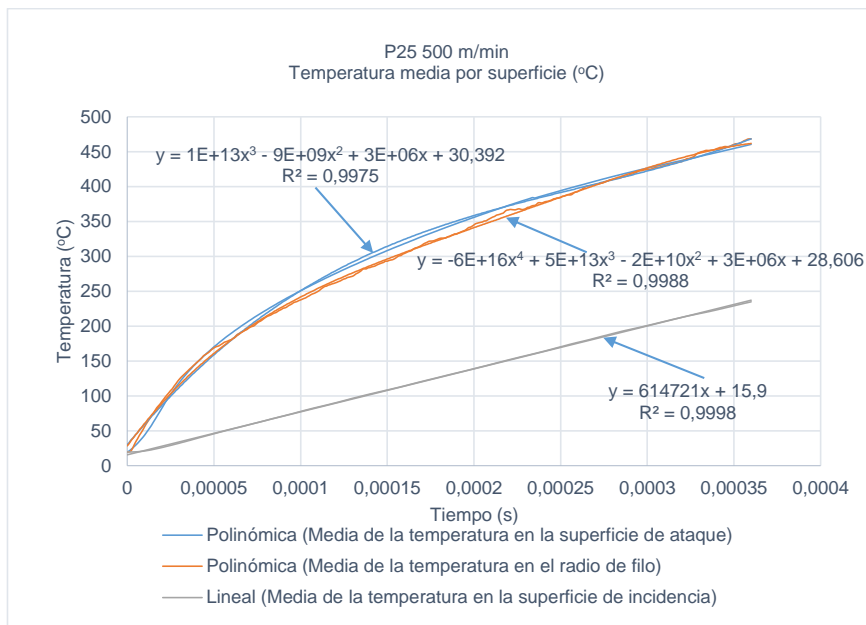


Figura 2.24 Ecuación de ajuste para cada superficie (P25 a 500 m/min).

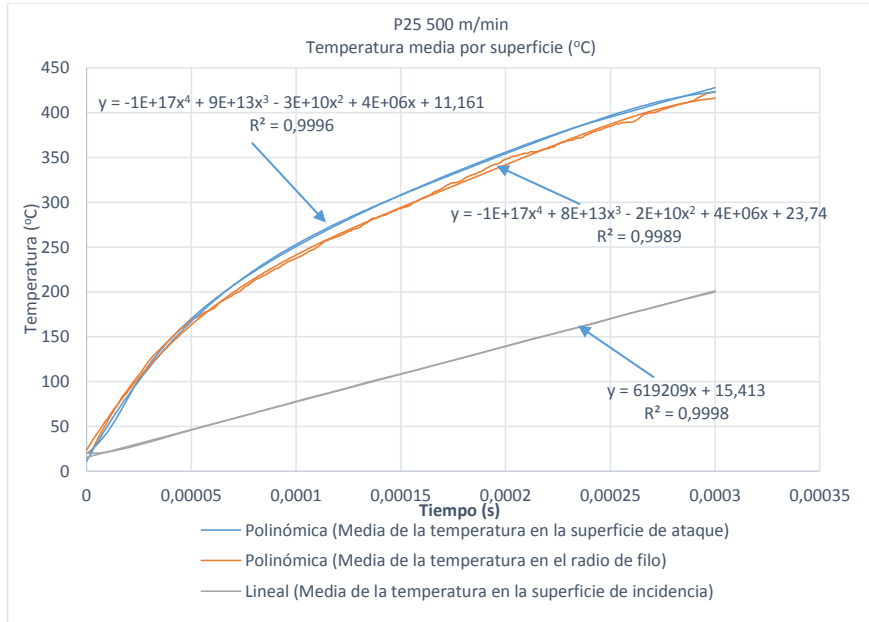


Figura 2.25 Ecuaciones de ajuste para cada superficie (P25 a 600 m/min).

En las Tablas 2.4, 2.5 y 2.6 se resumen las ecuaciones de ajuste de curvas obtenidas a partir de la simulación numérica.

Tabla 2.4 Ecuaciones de temperatura a partir de la simulación numérica (P10).

Velocidad de corte (m/min)	Zona de estudio	P10
400	Ataque	$= -3E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 22,284$
	Radio del filo	$= -2E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 34,892$
	Incidencia	$= -1E+08x^2 + 659743x + 13,483$
500	Ataque	$= -6E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 16,042$
	Radio del filo	$= -6E+16x^4 + 5E+13x^3 - 2E+10x^2 + 3E+06x + 28,606$
	Incidencia	$= -8E+07x^2 + 639500x + 14,516$
600	Ataque	$= -1E+17x^4 + 9E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 11,265$
	Radio del filo	$= -1E+17x^4 + 9E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 22,919$
	Incidencia	$= 620035x + 15,306$

Tabla 2.5 Ecuaciones de temperatura a partir de la simulación numérica (P15).

Velocidad de corte (m/min)	Zona de estudio	P15
400	Ataque	$= -3E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 9,0902$
	Radio del filo	$= -4E+16x^4 + 4E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 23,248$
	Incidencia	$= 484793x + 16,324$
500	Ataque	$= -5E+16x^4 + 5E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 5,7599$
	Radio del filo	$= -7E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 15,851$
	Incidencia	$= 495327x + 14,896$
600	Ataque	$= -6E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 4,251$
	Radio del filo	$= -9E+16x^4 + 8E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 13,595$
	Incidencia	$= 502949x + 14,058$

Tabla 2.6 Ecuaciones de temperatura a partir de la simulación numérica (P25).

Velocidad de corte (m/min)	Zona de estudio	P25
400	Ataque	$= -3E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 22,284$
	Radio del filo	$= -2E+16x^4 + 3E+13x^3 - 1E+10x^2 + 3E+06x + 34,892$
	Incidencia	$= 597602x + 18,133$
500	Ataque	$= -6E+16x^4 + 6E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 16,042$
	Radio del filo	$= -6E+16x^4 + 5E+13x^3 - 2E+10x^2 + 3E+06x + 28,606$
	Incidencia	$= 614721x + 15,9$
600	Ataque	$= -1E+17x^4 + 9E+13x^3 - 3E+10x^2 + 4E+06x + 11,161$
	Radio del filo	$= -1E+17x^4 + 8E+13x^3 - 2E+10x^2 + 4E+06x + 23,74$
	Incidencia	$= 619209x + 15,413$

Las ecuaciones obtenidas permiten obtener los siguientes criterios:

- Se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que modelan el comportamiento de la distribución de temperaturas en el mecanizado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045 con insertos P10, P15 y P25. Se observó un comportamiento de la temperatura en la superficie de incidencia similar para las tres velocidades de corte estudiadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min). Esto indica que estas herramientas de corte, en esta superficie, no sufren alteraciones notables en su comportamiento al trabajar a altas velocidades de corte. No sucede así con el caso del inserto P10, debido a que no posee capas de protección térmica.
- Para el caso de la superficies de ataque y el radio del filo, se observa una similitud en el comportamiento de los insertos P15 y P25 a las tres velocidades de corte analizadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min), notándose la no

aparición de efectos notables a alta velocidad. En el caso del inserto P10, se obtienen distribuciones con pequeñas diferencias, producto de su composición química, diferente a los insertos P5 y P25.

Conclusiones

1. Se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que modelan el comportamiento de la distribución de temperaturas en el mecanizado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045 en los insertos P10, P15 y P25. Se observó un comportamiento de la temperatura en la superficie de incidencia similar para las tres velocidades de corte estudiadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min). Esto indica que estas herramientas de corte, en esta superficie, no sufren alteraciones notables en su comportamiento al trabajar a altas velocidades de corte.
2. Se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que modelan el comportamiento del flujo de calor en el mecanizado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045 en los insertos P10, P15 y P25. Se observó un comportamiento similar para las tres herramientas de corte.
3. Para el caso de la superficies de ataque y el radio del filo, se observa una similitud en el comportamiento de los insertos P15 y P25 a las tres velocidades de corte analizadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min), notándose la no aparición de efectos notables a alta velocidad.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se obtuvieron las ecuaciones de ajuste que modelan el comportamiento de la distribución de temperaturas en el mecanizado de alta velocidad en seco del acero AISI 1045 con insertos P10, P15 y P25.
2. Se observó un comportamiento de la temperatura en la superficie de incidencia similar para las tres velocidades de corte estudiadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min). Esto indica que estas herramientas de corte, en esta superficie, no sufren alteraciones notables en su comportamiento al trabajar a altas velocidades de corte. No sucede así con el caso del inserto P10, debido a que no posee capas de protección térmica.
3. Para el caso de la superficies de ataque y el radio del filo, se observa una similitud en el comportamiento de los insertos P15 y P25 a las tres velocidades de corte analizadas (400 m/min, 500 m/min y 600 m/min), notándose la no aparición de efectos notables a alta velocidad. En el caso del inserto P10, se obtienen distribuciones con pequeñas diferencias, producto de su composición química, diferente a los insertos P15 y P25.
4. La investigación demuestra la validez del método de los elementos finitos para el estudio del proceso del corte de los metales.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios de simulación numérica para el caso de estudio, con mayores tiempos de procesamiento, para aumentar la exactitud de los resultados comparativos.
2. Realizar estudios de simulación numérica de flujos de calor para herramientas de corte similares, que faciliten un estudio comparativo de mayor amplitud.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martínez Aneiro F., T. Sánchez Battaille, G. Frías Figueroa, and A. P. Vázquez, "Comportamiento del acabado superficial de la pieza y el desgaste de la herramienta al fresar aluminio con altas velocidades de corte en fresadoras cnc convencionales.," *Ingeniería Mecánica*, vol. 2, pp. 7-12, 2006.
- [2] L. W. Hernández-González, "Estudio experimental del desgaste del flanco y de las fuerzas de corte en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 1045," Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín, 2011.
- [3] T. Özel and T. Altan, "Determination of workpiece flow stress and friction at the chip-tool contact for high-speed cutting," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 133–152, 2000.
- [4] V. P. Astakhov, *Metal Cutting Mechanics*. Boca Raton, USA: CRC Press, 1998.
- [5] V. Arshinov and G. Alekseev, *Metal Cutting Theory and Cutting Tool Design*. Moscú: Editorial Mir, 1970.
- [6] *Torneado general*, 2009.
- [7] V. P. Astakhov, "The assessment of cutting tool wear," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 44, pp. pp. 637–647, May 2004 2004.
- [8] V. P. Astakhov, "Tribology of metal cutting," in *Mechanical Tribology*, H. L. G. E. Totten, Ed., ed New York: Marcel Dekker, 2004, pp. 307-346.
- [9] V. P. Astakhov, *Tribology of metal cutting*. London: Elsevier, 2006.
- [10] V. P. Astakhov and J. P. Davim, "Tools (Geometry and Material) and Tool Wear," in *Machining. Fundamentals and Recent Advances*, J. P. Davim, Ed., ed London: Springer-Verlag London Limited, 2008, pp. 39-41.
- [11] V. P. Astakhov and X. Xiao, "A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system," *Machining Science and Technology*, vol. 12, pp. pp. 325–347, 2008.
- [12] T. Özel and T. Altan, "Process simulation using finite element method — prediction of cutting forces, tool stresses and temperatures in high speed flat end milling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 40, pp. 713–738, 2000.
- [13] T. Özel, "Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 141, pp. 284–293, 2003.
- [14] T. Özel and E. Zeren, "A methodology to determine work material flow stress and tool chip interfacial friction properties by using analysis of machining," in *2004 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Anaheim, California, 2004, pp. 1-9.
- [15] T. Özel and E. Zeren, "Determination of work material flow stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 153-154, pp. 1019-1025, 2004.

- [16] T. Özel and E. Zeren, "Finite element modeling of stresses induced by high speed machining with round edge cutting tools," in *2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, Florida, 2005, pp. 1-9.
- [17] Y. C. Yen, S. J., L. Blaine, and T. Altan, "Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 146, pp. 82-91, 2004.
- [18] Y. Karpat and T. Özel, "An analytical - thermal modeling approach for predicting forces, stresses and temperatures in machining with worn tools," in *2005 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, Orlando, Florida, 2005, pp. 1-10.
- [19] Y. Karpat and T. Özel, "An integrated analytical thermal model for orthogonal cutting with chamfered tools," *Transactions of NAMRI/SME*, vol. 34, pp. 1-16, 2006.
- [20] Y. Karpat and T. Özel, "Predictive Analytical and Thermal Modeling of Orthogonal Cutting Process—Part I: Predictions of Tool Forces, Stresses, and Temperature Distributions," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, pp. 435-444, 2006.
- [21] Y. Karpat and T. Özel, "Mechanics of high speed cutting with curvilinear edge tools," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, pp. p. 195–208, 2008.
- [22] I. Uçun and K. Aslantas, "Numerical simulation of orthogonal machining process using multilayer and single-layer coated tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 54, pp. 899-910, 2011.
- [23] Y. R. Bhojar and P. D. Kamble, "Finite element analysis on temperature distribution in turning process using DEFORM-3D," *IJRET*, vol. 2, pp. 901-906, 2013.
- [24] J. Soriano, I. Llanos, T. Özel, and P. J. Arrazola, "Comparison of 3D Finite Element Models for Chip Formation Process Developed Under Different FE Software," in *12th Cirp Conference on Modelling of Machining Operations*, Donostia-San Sebastián, Spain, 2009.
- [25] H. Bil, "Simulation of Orthogonal Metal Cutting by Finite Element Analysis," Master Master Thesis, Mechanical Engineering, The Middle East Technical University, 2003.
- [26] C. Kiliçaslan, "Modelling and Simulation of Metal Cutting by Finite Element Method," Master Master Thesis, Mechanical Engineering, İzmir Institute of Technology, 2009.
- [27] C. M. Ramos, "MEF Analysis in Machining and Experimental Validation," PhD, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2008.
- [28] T. Özel and E. Zeren, "A methodology to determine work material flow stress and tool-chip interfacial friction properties by using analysis of machining," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, vol. 128, pp. 119-129, 2006.
- [29] M. Vaz, D. R. J. Owen, V. Kalhori, M. Lundblad, and L.-E. Lindgren, "Modelling and Simulation of Machining Processes," *Arch Comput Methods Eng*, vol. 14, pp. 173-204, 2007.

- [30] W. Gurri-Carballosa, "Simulación de la distribución de temperatura en el torneado de alta velocidad de piezas de acero AISI 1045 por el método de elementos finitos," Máster en Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas Máster en Mantenimiento y Reacondicionamiento de Máquinas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín, Holguín, 2014.
- [31] S. P. F. C. Jaspers and J. H. Dautzenberg, "Material Behavior in Conditions Similar to Metal Cutting: Flow Stress in the Primary Shear Zone," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 122, pp. 322–330, 2002.
- [32] L. W. Hernández-González, "Estudio experimental del desgaste del flanco y de las fuerzas de corte en el torneado en seco de alta velocidad del acero AISI 1045," Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Holguín, Holguín, 2011.