

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio comparativo con elementos finitos
del modelo analítico de cálculo de temperatura en viruta de Boothroyd

Autor: Sara Lozano Izquierdo

Tutor: Luis V. Bohórquez Jiménez

**Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio comparativo con elementos finitos del modelo analítico de cálculo de temperatura en viruta de Boothroyd

Autor:

Sara Lozano Izquierdo

Tutor:

Luis V. Bohórquez Jiménez

Profesor Contratado Doctorr

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Máster: Estudio comparativo con elementos finitos del modelo analítico de cálculo de temperatura en viruta de Boothroyd

Autor: Sara Lozano Izquierdo
Tutor: Luis V. Bohórquez Jiménez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

A mis padres y hermana, por ayudarme en estos dos años, que como bien saben, han sido de todo menos fáciles.

A mis abuelos, por confiar siempre.

A David y Lola, porque Sevilla siempre será un lugar especial.

A mi tutor Luis, por estar siempre a dispuesto a ayudar y a resolver todas mis dudas.

*Sara Lozano Izquierdo
Burgos, 2021*

Resumen

Es trabajo pretende estimar la máxima temperatura alcanzada en la viruta durante el mecanizado en metales. Debido a la complejidad de medición se han empleado 2 procesos de cálculo de forma paralela: un método analítico y otro empleando la técnica de elementos finitos.

Para determinar la similitud de los resultados de ambos métodos se han realizado varias simulaciones en función de 3 parámetros clave del proceso: avance, ángulo de fricción y ángulo de desprendimiento.

Este análisis por elementos finitos del método analítico no solo se ha centrado en el valor de temperatura máxima si no que se han comparado otros parámetros como son: el coeficiente de fricción aparente, el salto de temperatura en la zona primaria de deformación, las dimensiones de la zona secundaria de deformación, etc y con ello tener una visión general de ambos métodos.

Además la simulación por elementos finitos ha permitido obtener una simulación visual del proceso de mecanizado.

Abstract

This project aims to estimate the maximum temperature reached in the shavings during metal machining. Due to the complexity of the measurement, 2 calculation processes have been used in parallel: an analytical method and another using the finite element technique.

To determine the similarity of the results of both methods, several simulations have been carried out based on 3 key parameters of the process: advance, friction angle and rake angle.

This finite element analysis of the analytical method has not only focused on the maximum temperature value but other parameters have been compared such as the apparent friction coefficient, the temperature jump in the primary deformation zone, the dimensions of the secondary deformation zone, etc., thereby giving an overview of both methods.

In addition, the simulation by finite elements has enabled the obtaining of a visual simulation of the mechanized process.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Índice de Tablas</i>	IX
<i>Índice de Figuras</i>	XI
<i>Notación</i>	XIII
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	1
2 Mecánica del Corte de Metales	3
2.1 Zonas de Deformación	4
2.2 Fuerzas en el corte	4
2.3 Energía de corte	5
2.4 Temperatura en el corte de metal	5
2.4.1 Análisis teórico de la temperatura en la Zona Primaria de Deformación	7
2.4.2 Análisis teórico de la Temperatura en la Zona Secundaria de Deformación	8
2.5 Condiciones de contorno más próximas a la realidad	9
3 Introducción a la simulación mediante DEFORM 2.0	11
4 Proceso de Cálculo	13
4.1 Cálculo de Temperatura Máxima de Corte analíticamente	13
4.1.1 Datos Iniciales	13
4.1.2 Variables	13
4.1.3 Metodología	14
4.1.4 Resultados	16
4.2 Cálculo de Temperatura Máxima mediante Deform 2.0	28
4.2.1 Datos de entrada	28
4.2.2 Herramienta	28
4.2.3 Pieza	29
4.2.4 Metodología	29
4.2.5 Resultados	30

5	Análisis de resultados	35
5.1	Análisis de la sección secundaria de deformación	35
5.1.1	Comparación de la superficie de la fuente de calor dentro de la viruta suponiendo deformación uniforme	35
5.1.2	Comparación de las superficies de calor suponiendo deformación uniforme en la viruta con l_f como constante	39
5.1.3	Comparación de las superficies de calor suponiendo deformación no uniforme en la viruta con l_f como constante	41
5.2	Análisis de las temperaturas finales igualando el área de la sección secundaria de método analítico y de elementos finitos	44
5.3	Salto de temperatura de la Zona Primaria de Deformación	46
5.4	Fracción de calor transmitida a la pieza de trabajo	48
5.5	Coefficiente de rozamiento	55
6	Conclusiones	59
	<i>Bibliografía</i>	61

Índice de Tablas

4.1	Ángulos de desprendimiento y de fricción seleccionados [3]	14
4.2	Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.25mm$	17
4.3	Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.25mm$	18
4.4	Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.25mm$	18
4.5	Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.25mm$	19
4.6	Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.25mm$	19
4.7	Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.25mm$	20
4.8	Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.30mm$	21
4.9	Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.30mm$	22
4.10	Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.30mm$	22
4.11	Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.30mm$	23
4.12	Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.30mm$	23
4.13	Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.30mm$	24
4.14	Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.50mm$	25
4.15	Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.50mm$	26
4.16	Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.50mm$	26
4.17	Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.50mm$	27
4.18	Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.50mm$	27
4.19	Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.50mm$	28
4.20	Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$	30
4.21	Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.30mm$	31
4.22	Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.50mm$	31
5.1	Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,25mm$	36
5.2	Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,30mm$	36
5.3	Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,50mm$	36
5.4	Cálculo del área rectangular y triangular (suponiendo deformación uniforme) igualando la temperatura final de ambos métodos	38
5.5	Ancho adimensional igualando el área analítica y de elementos finitos	39
5.6	Cálculo del área rectangular y triangular suponiendo deformación uniforme y la longitud de contacto viruta-herramienta como constante para la misma temperatura final en ambos métodos	40
5.7	Ancho adimensional igualando el área analítica y de elementos finitos con la longitud de contacto viruta-herramienta como constante	41
5.8	Cálculo del área rectangular y triangular considerando deformación no uniforme en la sección	43

5.9	Ancho adimensional obtenido igualando ambas áreas y considerando deformación no uniforme	44
5.10	Ancho de la sección triangular y triangular para el mismo valor de sección	45
5.11	Comparación de temperatura final de ambos métodos para el mismo valor de sección de la zona secundaria de deformación	45
5.12	Error relativo de la temperatura máxima	46
5.13	Error relativo medio de la temperatura máxima	46
5.14	Comparación del salto de temperatura correspondiente a la primera zona de deformación por ambos métodos	48
5.15	Error relativo del salto de temperatura de la zona primaria de deformación	48
5.16	Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$	50
5.17	Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.30mm$	51
5.18	Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.50mm$	51
5.19	Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.25mm$	52
5.20	Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.30mm$	52
5.21	Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.50mm$	52
5.22	Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$	54
5.23	Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$	54
5.24	Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$	55
5.25	Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.25mm$	56
5.26	Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.30mm$	56
5.27	Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.50mm$	56

Índice de Figuras

2.1	Esquema general de mecanizado de metales [6]	3
2.2	Esquema de corte ortogonal de metales [6]	3
2.3	Ángulos principales en el mecanizado	4
2.4	Esquema de fuerzas en el proceso de mecanizado [6]	5
2.5	3 zonas principales de conversión de la energía en calor [6]	6
2.6	3 zonas principales de conversión de la energía en calor [6]	6
2.7	Relación datos experimentales y teóricos entre Γ y $R \tan \phi$ [6]	8
2.8	Condiciones de contorno en la viruta próximas a la realidad [6]	9
3.1	Ejemplo de discretización [7]	12
4.1	Relación del factor de corrección con el espesor de la viruta indeformada [6]	14
4.2	Asistente de configuración	29
4.3	Herramienta definida	29
4.4	Asistente de configuración de la pieza de trabajo	29
4.5	Mallado de la herramienta	30
4.6	Mallado de la pieza	30
4.7	Configuración de corte	30
5.1	fuentes de calor dentro de la viruta	35
5.2	Esquema para la estimación de la superficie de la fuente de calor analíticamente	37
5.3	Esquema para la estimación de la superficie de la fuente de calor de elementos finitos	37
5.4	Vista de elementos finitos de la zona secundaria de deformación	42
5.5	Comparación de la zona secundaria de deformación secundaria analítica y de elementos finitos	42
5.6	Zona de Deformación Primaria	47
5.7	Menú de Deform 2.0	49
5.8	Variación de la fuerza de corte frente al tiempo	49
5.9	Variación de la fuerza de empuje frente al tiempo	50
5.10	Ejemplo de medida del ángulo de deslizamiento (ϕ)	51
5.11	Triángulo que relaciona los anchos de viruta	53

Notación

ρ	Densidad
c	Calor Específico
k	Conductividad Térmica
θ	Salto de temperatura
v_c	Velocidad de corte
v_o	Velocidad de la viruta
a_c	Avance o Ancho de viruta indeformada
a_o	Ancho de la viruta deformada
a_w	Espesor de viruta indeformada
p_s	Energía específica de corte
p_{sR}	Energía específica de corte de referencia
R	Número Térmico
f	Factor de corrección de la energía específica
μ	Coefficiente de rozamiento
γ	Ángulo de desprendimiento
ϕ	Ángulo de deslizamiento
β	Ángulo de fricción
i	Ángulo de incidencia
ϕ_o	Parámetro de la teoría Ernst-Merchant
k	Parámetro de la teoría Ernst-Merchant
Γ	Fracción de calor transmitido a la pieza
F_c	Fuerza de corte
F_f	Fuerza de fricción
P_m	Potencia mecánica de corte
P_f	Potencia o calor de fricción
P_s	Potencia o calor generado en la zona primaria de deformación
θ_f	Salto medio de temperatura por fricción
θ_o	Temperatura media del taller
θ_s	Salto medio de temperatura en la zona primaria de deformación
θ_m	Salto medio de temperatura en la zona secundaria de deformación
θ_{max}	Temperatura máxima alcanzada en la viruta
l_f	Longitud de contacto herramienta-viruta analítica

w_o	Parámetro adimensional de la zona secundaria de deformación
L	Longitud de contacto herramienta-viruta de elementos finitos
H	Ancho de la zona secundaria de deformación de elementos finitos
l_o	Longitud de contacto pieza-herramienta adimensional

1 Introducción

La fabricación mediante mecanizado es una práctica habitual en el sector industrial actual. Se denomina mecanizado, al proceso que permite eliminar material y así conseguir la pieza deseada. En función del material a mecanizar se emplearán distintos métodos. Este proceso de corte está caracterizado por dos elementos que son la pieza a fabricar y la herramienta.

El mecanizado de materiales metálicos es una variante importante que se empezó a desarrollar hace más de 200 años. Según estudios publicados, la primera referencia al corte de metales data de 1851. Este primer trabajo pretendía determinar la energía necesaria que hay que aportar para eliminar cierta cantidad de material de la pieza de trabajo.

Tras la publicación de varios estudios, se estableció que las condiciones y el material de la herramienta influye de forma significativa en las características del corte así como en la vida útil de la misma. La viruta que se forma al eliminar el material, también tiene un papel importante en el mecanizado.

El autor Taylor entorno al año 1900 publicó varios estudios con el objetivo de definir las condiciones óptimas de corte. Enunció una ley empírica que relacionaba la vida útil de la herramienta con la velocidad de corte. Es reseñable que a día de hoy, esta ley sigue vigente y se emplea como base para numerosos trabajos relacionados con la economía de mecanizado.

Uno de los descubrimientos más importantes realizados por Taylor fue que la temperatura alcanzada en el filo de la herramienta durante el proceso de corte influye en su tasa de desgaste.

1.1 Objetivos

Este trabajo se centra en la estimación de la temperatura máxima alcanzada durante el mecanizado en metales. Para ello se han empleado dos métodos de cálculo de forma paralela.

Por un lado, se ha determinado esta temperatura máxima de forma analítica, empleando el método de calculo recogido por Boothroyd en su libro *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, capítulo 3 [6].

Por otro lado, se ha usado el programa DEFORM 2.0 que mediante simulación por elementos finitos estima esta temperatura.

Por tanto los objetivos son:

- Determinar el nivel de exactitud de los resultados teóricos y obtener si fuese posible, una relación entre ambos métodos.
- Comparar otras variables importantes de ambos procesos de cálculo para así tener información del proceso intermedio y no solo atender al resultado final.
- Obtener el salto de temperatura en la zona primaria de deformación analíticamente y por elementos finitos.
- Calcular el coeficiente de fricción aparente.
- Estimar la fracción de calor transmitida a la pieza por elementos finitos y por el método analítico.
- Comparar el área de la zona de deformación secundaria analítica y la que se observa en la simulación.
- Realizar varias situaciones (con diferentes parámetros iniciales) para conseguir que los resultados sean lo más fiables posibles.

En el documento siempre que se haga referencia al proceso analítico se refiere al proceso recogido por Boothroyd. En cambio, el proceso de elementos finitos, hace referencia al proceso del programa Deform 2.0.

2 Mecánica del Corte de Metales

El mecanizado en metales se puede modelar, en su caso más general, como un corte oblicuo en el que participa la pieza de trabajo (metálica) y la herramienta de corte, como se muestra en la figuras inferiores.

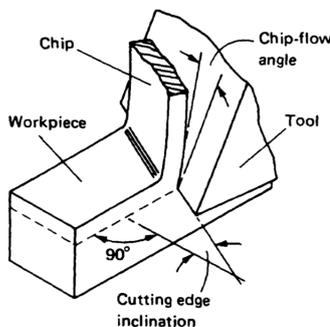


Figura 2.1 Esquema general de mecanizado de metales [6].

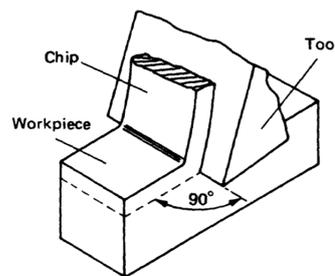


Figura 2.2 Esquema de corte ortogonal de metales [6].

Existe un caso especial de mecanizado conocido como corte ortogonal (figura 2), en el que el filo de la herramienta es perpendicular al movimiento relativo entre pieza y herramienta. Este tipo de configuración es una simplificación frente al caso general, ya que se modela un proceso bidimensional. Por este motivo, es muy usada en trabajos teóricos y experimentales.

En este trabajo se ha supuesto un problema bidimensional, que se ha configurado con un corte ortogonal.

Durante el corte, la herramienta penetra la pieza con un cierto ángulo, conocido como ángulo de incidencia (i). Se llama ángulo de desprendimiento (γ), al ángulo que forma la cara de la herramienta con la dirección normal a la superficie de trabajo. Este parámetro es importante en la configuración del corte de metales.

El ángulo formado entre la cara de la herramienta y la cara de incidencia se conoce como ángulo de fricción (β). Estos tres ángulos suman 90° en el mecanizado.

Además de los ya mencionados, existe otro ángulo importante que se llama ángulo de deslizamiento (ϕ).

En la imagen posterior se han esquematizado todos los ángulos que caracterizan el proceso:

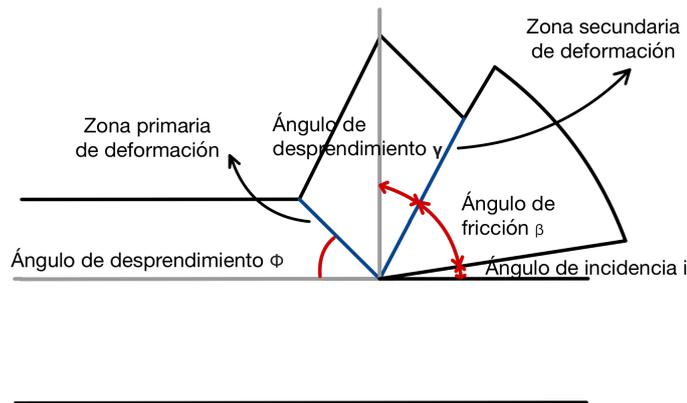


Figura 2.3 Ángulos principales en el mecanizado.

2.1 Zonas de Deformación

Existen dos zonas principales de deformación: primaria y secundaria.

La zona de deformación primaria (Z.D.P) coincide con la zona de formación de viruta. Este región abarca desde el borde de corte de la herramienta hasta la unión entre las superficies de la viruta y la pieza de trabajo.

Posteriormente la viruta formada deslizará por la cara de la herramienta. Esta región se denomina zona secundaria de deformación (Z.D.S).

Numerosos estudios establecen que el proceso de formación de viruta influye en el acabado superficial de la pieza así como en el desgaste de la herramienta. Existen dos tipos de viruta: continua y discontinua.

La viruta continua es típica de materiales dúctiles como hierro, cobre o aluminio. El corte en estas condiciones se puede considerar estacionario.

La viruta discontinua se produce en materiales frágiles. Durante el mecanizado, el material sufre grandes deformaciones, que pueden crear fracturas. Este suceso ocurre en materiales como el hierro fundido o el latón. Sin embargo, también se puede dar en materiales dúctiles para muy bajas velocidades y altos avances.

Para este trabajo tanto analíticamente como por elementos finitos se ha considerado la formación de una viruta continua.

2.2 Fuerzas en el corte

En el corte ortogonal la fuerza ejercida por la herramienta sobre la pieza se puede descomponer, en fuerza de corte (paralela al movimiento relativo entre pieza y herramienta) y fuerza de empuje (perpendicular a la fuerza de corte). La fuerza resultante se distribuye sobre las áreas de la herramienta en contacto con la viruta y la pieza de trabajo.

En el proceso también se produce una fuerza de fricción que es paralela a la cara de la herramienta y una fuerza normal, perpendicular a esta última.

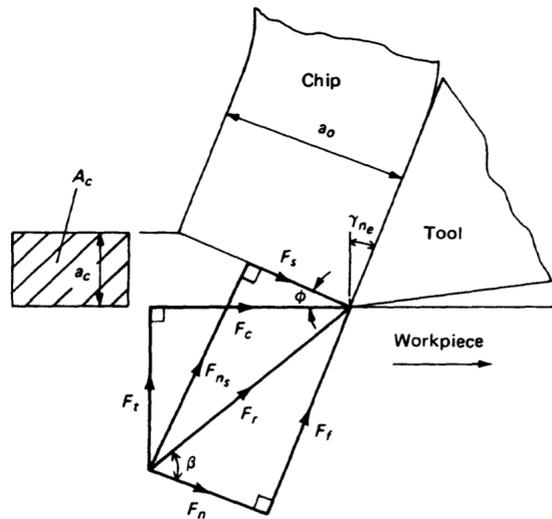


Figura 2.4 Esquema de fuerzas en el proceso de mecanizado [6].

2.3 Energía de corte

En el esquema se han representado todas las fuerzas presentes en el corte que se pueden relacionar entre ellas por trigonometría a través de los ángulos anteriormente mencionados.

La energía requerida para el proceso es el producto de la velocidad de corte por la fuerza de corte. Para determinar la eficiencia del proceso se emplea el concepto de energía específica de corte (p_s) que se define como la cantidad de energía consumida por unidad de volumen de material eliminado.

Este valor se encuentra generalmente tabulado ya que depende del material empleado, de la velocidad de corte y del avance. Para velocidades de corte y avances altos, la energía específica es constante.

2.4 Temperatura en el corte de metal

En el corte de metales se alcanzan temperaturas elevadas que tienen un efecto significativo en el desgaste de la herramienta y en la fricción que se produce entre ésta y la pieza.

En este proceso, la temperatura máxima alcanzada está condicionada por el comportamiento plástico o elástico del material.

- Comportamiento Elástico. La energía requerida para el corte se almacena a modo de energía de deformación, por lo que no se genera calor.
- Comportamiento Plástico. En este caso, la mayoría de la energía se convierte en calor.

En metales, se asume que el material tiene deformación plástica, debido a las altas tensiones a las que está sometido. Además, se desprecia la deformación elástica, ya que su valor es pequeño frente a la deformación total. Esto significa que prácticamente el total de la energía generada se convierte en calor.

Esta transformación de energía en calor ocurre en las siguientes secciones durante el corte:

- Zona de corte o lo que antes se denominó zona primaria de deformación.
- Zona secundaria de deformación.

- Herramienta. En la realidad la herramienta no está perfectamente afilada por lo que se genera calor. Sin embargo, se puede considerar despreciable frente a las zonas anteriores.

En la siguiente imagen se muestra lo descrito:

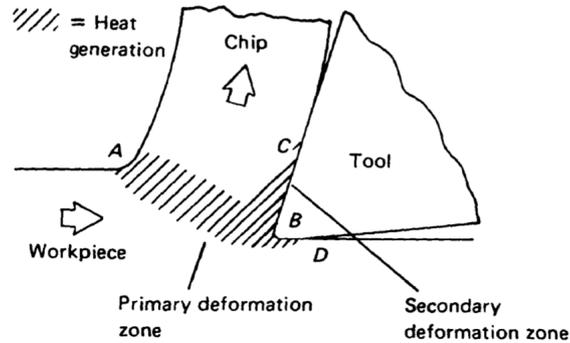


Figura 2.5 3 zonas principales de conversión de la energía en calor [6].

A continuación se ha seleccionado cuatro puntos de estudio en la pieza de trabajo para examinar qué zonas de generación de calor atraviesan en un corte ortogonal.

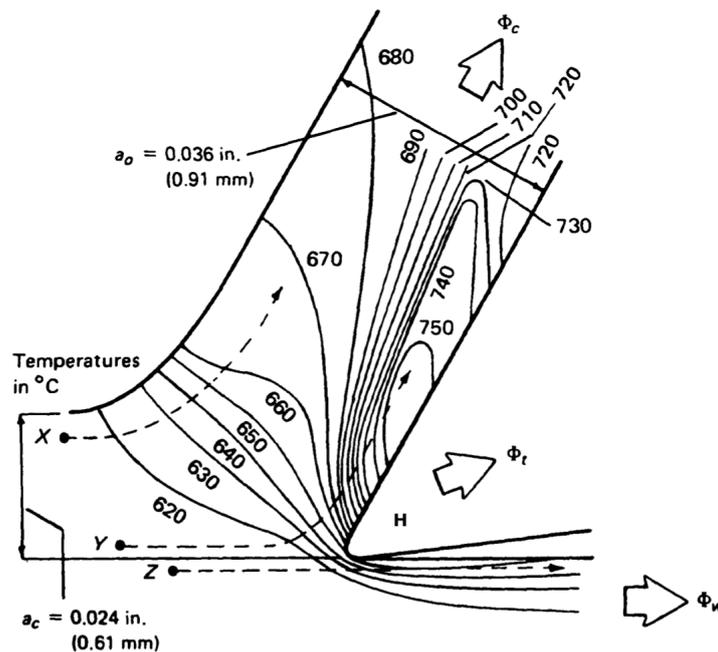


Figura 2.6 3 zonas principales de conversión de la energía en calor [6].

- **Punto X.** Situado en la zona interior del corte. Se dirige hacia la herramienta atravesando la zona primaria de deformación, donde se calienta hasta que pasa a formar parte de la viruta.
- **Punto Y.** Zona exterior de la pieza. Recorre ambas zonas de deformación (primaria y secundaria), calentándose hasta abandonar la secundaria. Posteriormente se enfría porque el calor se transmite por conducción hacia el interior de la viruta.

- **Punto Z.** No forma parte de la viruta por lo que no atraviesa las zonas de deformación. También aumenta su temperatura debido a un proceso de conducción del calor generado en la zona primaria de deformación.
- **Herramienta.** Se calienta por conducción de la zona secundaria de deformación.

Teóricamente, el valor máximo de temperatura se producirá en la cara de corte de la herramienta, a cierta distancia del eje de corte. El calor total generado se puede expresar en forma de potencia:

$$P_m = \phi_c + \phi_w + \phi_t \quad (2.1)$$

siendo:

- ϕ_t , calor de la herramienta.
- ϕ_w , calor de la pieza.
- ϕ_c , calor de la viruta

La viruta tiene una elevada velocidad por lo que tiene mayor capacidad para eliminar calor. Por esta razón ϕ_t puede considerarse despreciable (excepto a bajas velocidades de mecanizado).

2.4.1 Análisis teórico de la temperatura en la Zona Primaria de Deformación

El modelo idealizado considera esta zona como una fuente plana de calor con fuerza uniforme, donde el calor no se disipa por las superficies libres existentes entre la pieza de trabajo y viruta. Además se asume que las propiedades térmicas del material son constantes e independientes de la temperatura.

El autor Weiner estableció una simplificación del proceso térmico de esta sección, asumiendo que no hay transmisión de calor por conducción en la dirección del movimiento. Esto se debe a las altas velocidades que se producen, transmitiéndose el calor principalmente por transporte. De tal forma:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{R}{a_c} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} - \frac{R}{a_c} \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

Donde θ hace referencia al salto de temperatura; R es el número térmico, y a_c es el espesor de la viruta indeformada o avance.

El número térmico es un relación entre las propiedades del material de la pieza de trabajo (densidad, calor específico y conductividad térmica) y representa la capacidad de transmisión de calor.

El calor producido en esta zona se transmite tanto a la pieza como a la viruta. Se denomina Γ al porcentaje de calor transmitido a la pieza y por tanto, $1-\Gamma$ será el absorbido por la viruta.

A través de la ecuación superior y las condiciones de contorno del problema, Weiner definió una expresión que relaciona el porcentaje de calor transmitido a la pieza y el ángulo de deslizamiento ϕ (por ajuste de la gráfica posterior).

$$\Gamma \approx \frac{0.41}{(R \tan \phi)^{0.53}} \quad (2.3)$$

En la figura se comparan los datos experimentales con los resultados de la expresión:

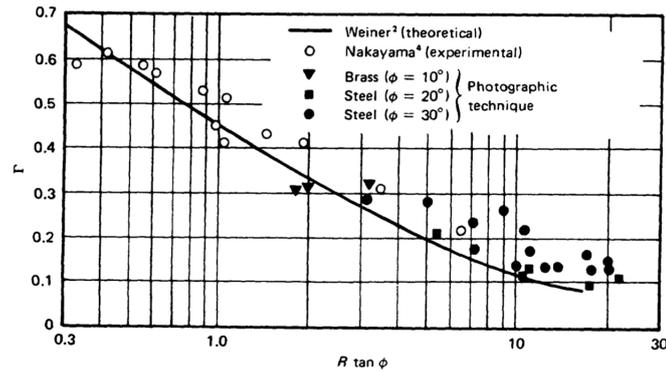


Figura 2.7 Relación datos experimentales y teóricos entre Γ y $R \tan \phi$ [6].

De la gráfica se obtuvieron las siguientes conclusiones:

1. Teóricamente, se obtienen valores más bajos de Γ para altos $R \tan \phi$ en relación a los experimentales.
2. Se ha tomado como hipótesis una fuente de calor plana. En la realidad el calor se genera en una amplia zona que abarca parte de la pieza. Esta diferencia es más significativa para velocidades y avances altos, lo que explica las discrepancias del punto anterior.

2.4.2 Análisis teórico de la Temperatura en la Zona Secundaria de Deformación

La temperatura máxima de mecanizado se alcanza en esta zona, exactamente en la viruta, cuando ésta abandona la segunda zona de deformación.

Esta temperatura es la suma de la temperatura ambiente y el salto de temperatura producido en ambas zonas de deformación:

$$\theta_{max} = \theta_o + \theta_s + \theta_m \quad (2.4)$$

Donde:

- θ_o : Temperatura ambiente de taller.
- θ_s : Salto de temperatura en la zona primaria de deformación.
- θ_m : Salto de temperatura en la zona secundaria de deformación.

Un estudio realizado por el autor Rapier, establece que la fricción entre la viruta y la pieza genera una fuente de calor plana con fuerza uniforme. Lo que se traduce en las siguientes expresiones:

$$\theta_f = \frac{P_f}{\rho c a_c a_w v_c} \quad (2.5)$$

$$\frac{\theta_m}{\theta_f} = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{R}{l_o}} \quad (2.6)$$

Sin embargo, comparando resultados teóricos con experimentales se observa que la teoría sobre estima el salto de temperatura en la zona secundaria (θ_m). Esto tiene sentido porque la fricción causa una gran deformación en el material de la viruta lo que provoca que la fuente de calor se extienda dentro de esta.

2.5 Condiciones de contorno más próximas a la realidad

En la imagen inferior se han esquematizado las condiciones de contorno más próximas a la realidad:

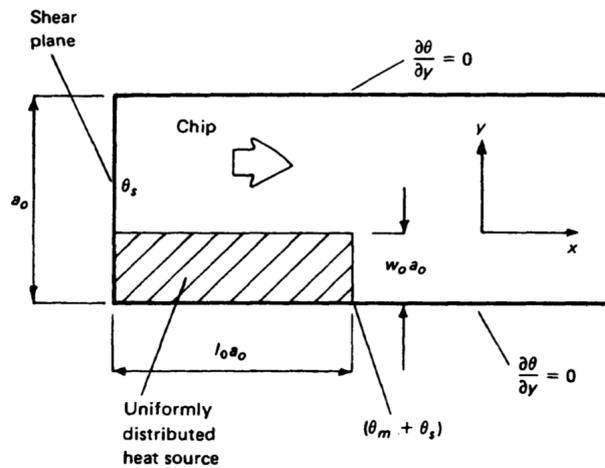


Figura 2.8 Condiciones de contorno en la viruta próximas a la realidad [6].

La zona rayada representa la fuente de calor que se extiende dentro de la viruta (zona secundaria de deformación). Tiene forma rectangular y se estima que tiene las dimensiones marcadas.

3 Introducción a la simulación mediante DEFORM 2.0

El programa DEFORM 2.0 es un software de simulación basado en elementos finitos que permite el análisis de procesos de mecanizado y de tratamiento térmico en metales.

El método de elementos finitos (MEF) es una técnica numérica para la resolución de problemas descritos como un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales. Se basa en la sustitución de un elemento continuo por una serie de elementos finitos, que serán más simples en geometría y por tanto, más sencillos de analizar que la estructura real [7].

Es un método de cálculo muy potente debido a su practicidad, ya que de forma relativamente rápida proporciona una solución próxima a la realidad. Además, permite reducir los costes ya que el estudio mediante experimentos (prueba y error) es un proceso mucho más lento y costoso.

La resolución de un problema por elementos finitos se divide en los siguientes pasos:

Selección del modelo matemático

En primer lugar es necesario conocer la física del problema a resolver, como son las cargas que actúan sobre el sistema, las condiciones de contorno simplificadas, las propiedades mecánicas del material de trabajo, etc. Con ello, es necesario definir el modelo matemático para determinar el conjunto de ecuaciones que gobiernan el problema [1].

Construcción del modelo de elementos finitos

A continuación es necesario modelar los elementos que intervienen en el problema a resolver, en este caso son la pieza de trabajo y la herramienta de corte.

Posteriormente es necesario discretizarlas, es decir, dividir el medio continuo en una serie de puntos por la intersección de las secciones o elementos finitos. A estos puntos se les denomina nodos y pueden ser interiores o situarse en el contorno del elemento. El conjunto de elementos finitos en los que se divide la pieza recibe el nombre de malla. [1]

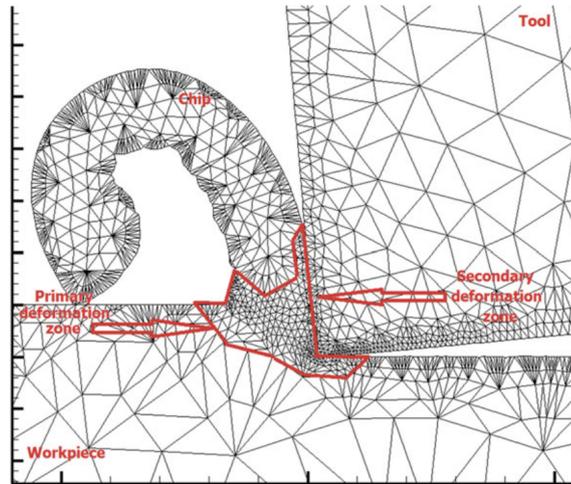


Figura 3.1 Ejemplo de discretización [7].

Resolución del modelo de elementos finitos

Consiste en la resolución de las ecuaciones del problema en cada nodo de la estructura en función de los grados de libertad. Cada nodo tendrá unas propiedades y variables diferentes. Estos valores nodales se interpolarán para obtener resultados en cada elemento finito.

Hay que tener en cuenta que en función del mallado utilizado o las dimensiones de la pieza estudiada la resolución del problema será más o menos costosa, es decir, se tardará más o menos tiempo en conseguir que converja la solución. Esto es importante para optimizar recursos en función de la necesidad de precisión de estudio buscada [8].

Postprocesado

En la fase final del método se presentan e interpretan los resultados. Para ello es muy útil la presentación de resultados de forma visual mediante gráficas o colores.

En el caso de DEFORM 2.0 permite exportar gran cantidad de variables de estudio de cada nodo y además de obtener una idea visual mediante gráficas y animaciones del proceso de corte [1].

4 Proceso de Cálculo

Como bien se señaló en la introducción del documento, el objetivo principal de este trabajo es estimar la similitud entre los resultados del método analítico y los de elementos finitos. A continuación se detallan ambos procesos de cálculo.

4.1 Cálculo de Temperatura Máxima de Corte analíticamente

En este apartado se describe el método recogido por Boothroyd en el Capítulo 3 de *Fundamentals of Maching and Machine Tools*. [6]

4.1.1 Datos Iniciales

En primer lugar es necesario definir el material de la pieza de trabajo así como sus propiedades. Se ha elegido aluminio aleado, Al-6061-T6, que presenta las siguientes características:

- Densidad, $\rho = 2700 \text{ kg/mm}^3$
- Calor Específico, $c = 896 \text{ J/kgK}$
- Conductividad Térmica, $k = 167 \text{ W/mK}$
- Temperatura Sólidos, 582°C

Otros datos fijos que caracterizan el corte son:

- Velocidad de corte, $v_c = 250 \text{ m/min}$
- Temperatura ambiente del taller, $\theta_o = 20^\circ\text{C}$
- Ancho de la viruta indeformada, $a_w = 1 \text{ mm}$ (se estudia un problema bidimensional)
- Energía específica de corte de referencia, $p_{sR} = 0,8 \text{ Nm/mm}^3$ [6]

4.1.2 Variables

El estudio de temperatura se ha realizado para 3 anchos de viruta indeformada o avance (a_c) diferentes. Se han tomado como valores: 0,25 mm; 0,30 mm y 0,5 mm.

Además para cada avance se ha variado el ángulo de desprendimiento γ y el ángulo medio de fricción β (esquematisados en la figura 3.1). Se ha calculado 6 combinaciones distintas según se muestra en la tabla inferior:

Tabla 4.1 Ángulos de desprendimiento y de fricción seleccionados [3].

Ángulos fijados en cada secuencia		
Secuencia	Ángulo de desprendimiento (γ)	Ángulo de fricción (β)
1	0°	15°
2	10°	30°
3	-5°	20°
4	5°	35°
5	2°	37°
6	-5°	35°

4.1.3 Metodología

A continuación se describe detalladamente el orden de las operaciones realizadas en el proceso analítico.

En primer lugar, se calcula la energía específica de corte según la expresión:

$$p_s = f \cdot p_{sR} \quad (4.1)$$

siendo f un factor corrección de la energía específica de referencia. Este factor depende del espesor de la viruta indeformada, como se muestra en la gráfica.

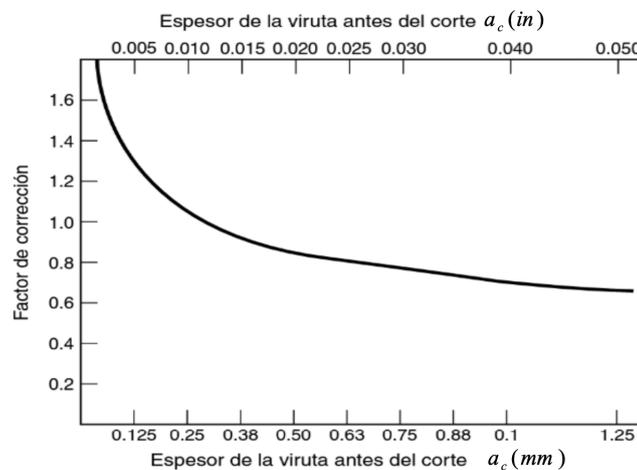


Figura 4.1 Relación del factor de corrección con el espesor de la viruta indeformada [6].

Conociendo la energía específica del corte es posible obtener el valor de la potencia mecánica necesaria para el corte, según la expresión:

$$P_m = p_s \cdot v_c \quad (4.2)$$

A continuación se calcula el valor de las fuerzas más importantes presentes en el proceso, como son la fuerza de corte y la fuerza de fricción:

$$F_c = p_s \cdot a_c \cdot a_w \quad (4.3)$$

$$F_f = \frac{F_c}{\frac{\cos\gamma}{\mu} + \text{sen}\gamma} \quad (4.4)$$

El coeficiente de rozamiento se puede relacionar con el ángulo de fricción como:

$$\mu = \tan\beta \quad (4.5)$$

El ángulo de deslizamiento (ϕ) se ha estimado según la hipótesis de Ernst&Merchant:

$$\phi = \phi_o - k \cdot (\beta - \gamma) \quad (4.6)$$

Los valores de ϕ_o y k se encuentran tabulados y dependen del material [5]. Se han tomado para todos los casos:

- $\phi_o = 42,48$
- $k=0,8$

El espesor de la viruta deformada se estima:

$$a_o = \frac{w_o}{0,2} \quad (4.7)$$

w_o es un parámetro adimensional que caracteriza el ancho de la fuente de calor dentro de la viruta (figura 2.8). Como valor de partida se ha asumido $w_o = 0,17$.

La velocidad de la viruta deformada se puede calcular empleando continuidad de flujo:

$$v_o \cdot a_o = v_c \cdot a_c \Rightarrow v_o = \frac{v_c \cdot a_c}{a_o} \quad (4.8)$$

A continuación se han obtenido las diferentes potencias presentes en el corte. La potencia calorífica disipada por la fricción entre viruta y herramienta, se estima como:

$$P_f = F_f \cdot v_o \quad (4.9)$$

El calor generado en la zona primaria o potencia (P_s) será el calor total generado menos lo que se disipa:

$$P_s = P_m - P_f \quad (4.10)$$

También es necesario calcular el porcentaje de calor transmitido a la pieza (Γ) y a la viruta, siendo muy inferior el porcentaje transmitido a la pieza, porque como ya se comentó, la viruta tiene mayor capacidad para eliminar calor que la herramienta debido a su alta velocidad.

A través del número térmico se obtiene el porcentaje de calor que se transmite a la pieza:

$$\Gamma = \frac{0.41}{(R \cdot \tan\phi)^{0.53}} \quad (4.11)$$

$$R = \frac{\rho \cdot c \cdot v_c \cdot a_c}{k} \quad (4.12)$$

Y lógicamente, el calor transmitido a la viruta será $(1 - \Gamma)$.

Por último, se calculan los saltos de temperatura en cada zona de deformación:

- Salto de temperatura en la Zona Primaria de Deformación

$$\theta_s = \frac{(1 - \Gamma) \cdot P_s}{\rho \cdot c \cdot a_c \cdot a_w \cdot v_c} \quad (4.13)$$

- Salto de temperatura por fricción:

$$\theta_f = \frac{P_f}{\rho \cdot c \cdot a_c \cdot a_w \cdot v_c} \quad (4.14)$$

- Salto de temperatura en la zona secundaria, que se obtiene en función del salto de temperatura por fricción con la siguiente expresión:

$$\frac{\theta_m}{\theta_f} = \frac{1,13 \cdot \sqrt{\frac{R}{l_o}}}{\left(1 + \frac{w_o}{w_{oo}}\right)^{3,5}} \quad (4.15)$$

$$w_{oo} = \frac{5.448}{\left(\frac{R}{l_o}\right)^{0,438}} \quad (4.16)$$

l_o es un parámetro adimensional:

$$l_o = [\mu + \tan(\phi - \gamma)] \cdot \frac{1}{3} \cdot \left[2 + \frac{1 + \frac{\pi}{2} - 2\phi}{\tan(\phi + \beta - \gamma)} \right] \quad (4.17)$$

Finalmente, la temperatura máxima será:

$$\theta_{max} = \theta_o + \theta_m + \theta_s \quad (4.18)$$

4.1.4 Resultados

A continuación se recogen los resultados obtenidos para cada combinación de ángulos y avance.

1. Avance 0.25 mm

Tabla 4.2 Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 1		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	0°
Ángulo de fricción	β	15°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	53.58 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.12
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.88
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$267.28 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$26.06 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$81.25 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima 368.53 °C		

Tabla 4.3 Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 2		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8\text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	10°
Ángulo de fricción	β	30°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	106.36 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.13
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.87
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$242.41\text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$51.72\text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$159.73\text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $422.14\text{ }^\circ\text{C}$		

Tabla 4.4 Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 3		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8\text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	20°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	92.48 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.14
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.86
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$252.61\text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$36.70\text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$111.47\text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $384.08\text{ }^\circ\text{C}$		

Tabla 4.5 Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 4		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	132.42 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.15
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.85
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$225.78 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$64.40 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$191.81 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima 437.59 °C		

Tabla 4.6 Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 5		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	2°
Ángulo de fricción	β	37°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	146.93 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.17
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.83
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$216.24 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$71.45 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$209.32 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima 445.57 °C		

Tabla 4.7 Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.25\text{mm}$.

CASO 6		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	1
Espesor viruta indeformada	a_c	0.25 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	200 N
Fuerza de fricción	F_f	149.70 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.18
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.82
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	210.69°C
Salto de temperatura por fricción	θ_f	72.80°C
Salto de temperatura Zona Secundaria	θ_m	212.02°C
Temperatura Máxima 442.71°C		

2. Avance 0.30 mm

Tabla 4.8 Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.30\text{mm}$.

CASO 1		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	0°
Ángulo de fricción	β	15°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	61.08N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.11
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.89
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$252.79 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$29.70 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$98.77 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $371.56 \text{ }^\circ\text{C}$		

Tabla 4.9 Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.30\text{mm}$.

CASO 2		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	10°
Ángulo de fricción	β	30°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	121.25 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.12
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.88
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$224.83 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$58.96 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$194.23 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $439.06 \text{ }^\circ\text{C}$		

Tabla 4.10 Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.30\text{mm}$.

CASO 3		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	20°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	86.02 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.13
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.87
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$237.52 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$41.83 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$135.61 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $393.13 \text{ }^\circ\text{C}$		

Tabla 4.11 Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.30mm$.

CASO 4		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 Nm/mm^3$
Factor de corrección	f	0.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	150.96 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.14
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.86
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$207.49^\circ C$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$73.41^\circ C$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$233.48^\circ C$
Temperatura Máxima $460.97^\circ C$		

Tabla 4.12 Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.30mm$.

CASO 5		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 Nm/mm^3$
Factor de corrección	f	0.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	2°
Ángulo de fricción	β	37°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	167.50 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.15
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.85
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$197.66^\circ C$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$81.45^\circ C$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$254.91^\circ C$
Temperatura Máxima $472.58^\circ C$		

Tabla 4.13 Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.30\text{mm}$.

CASO 6		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.95
Espesor viruta indeformada	a_c	0.30 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	228 N
Fuerza de fricción	F_f	170.66 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.17
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.83
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$192.75 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$82.99 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$258.25 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima $470.99 \text{ }^\circ\text{C}$		

3. Avance 0.50 mm

Tabla 4.14 Resultados del caso 1 analítico para $a_c = 0.50\text{mm}$.

CASO 1		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	0°
Ángulo de fricción	β	15°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	91.09 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.08
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.92
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$216.18 \text{ }^\circ\text{C}$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$44.30 \text{ }^\circ\text{C}$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$174.39 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatura Máxima 411.07 °C		

Tabla 4.15 Resultados del caso 2 analítico para $a_c = 0.50\text{mm}$.

CASO 2		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	10°
Ángulo de fricción	β	30°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	180.81 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.09
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.91
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	175.63°C
Salto de temperatura por fricción	θ_f	87.93°C
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	343.25°C
Temperatura Máxima 538.88°C		

Tabla 4.16 Resultados del caso 3 analítico para $a_c = 0.50\text{mm}$.

CASO 3		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	20°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	128.28 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.10
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.90
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	197.38°C
Salto de temperatura por fricción	θ_f	62.38°C
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	240.02°C
Temperatura Máxima 457.41°C		

Tabla 4.17 Resultados del caso 4 analítico para $a_c = 0.50mm$.

CASO 4		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 Nm/mm^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	225.12 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.11
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.89
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$153.53^\circ C$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$109.48^\circ C$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$413.96^\circ C$
Temperatura Máxima $587.49^\circ C$		

Tabla 4.18 Resultados del caso 5 analítico para $a_c = 0.50mm$.

CASO 5		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{sR}	$0,8 Nm/mm^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	2°
Ángulo de fricción	β	37°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	249.77 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.11
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.89
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	$141.28^\circ C$
Salto de temperatura por fricción	θ_f	$121.47^\circ C$
Sato de temperatura Zona Secundaria	θ_m	$452.62^\circ C$
Temperatura Máxima $613.91^\circ C$		

Tabla 4.19 Resultados del caso 6 analítico para $a_c = 0.50\text{mm}$.

CASO 6		
Datos de entrada		
Parámetro	Abreviatura	Valor
Energía específica de referencia	p_{SR}	$0,8 \text{ Nm/mm}^3$
Factor de corrección	f	0.85
Espesor viruta indeformada	a_c	0.50 mm
Velocidad de corte	v_c	250 m/min
Ángulos		
Ángulo de desprendimiento	γ	-5°
Ángulo de fricción	β	35°
Resultados		
Fuerza de corte	F_c	340 N
Fuerza de fricción	F_f	254.49 N
Espesor viruta deformada	a_o	0.85 mm
Porcentaje de calor a la pieza	Γ	0.13
Porcentaje de calor a la viruta	$(1 - \Gamma)$	0.87
Salto de temperatura Zona Primaria	θ_s	137.38°C
Salto de temperatura por fricción	θ_f	123.76°C
Salto de temperatura Zona Secundaria	θ_m	458.77°C
Temperatura Máxima 616.15°C		

4.2 Cálculo de Temperatura Máxima mediante Deform 2.0

En este apartado se recoge resumidamente los datos necesarios para cada simulación. Se ha elegido los mismos valores y material para cada simulación que analíticamente para que los resultados sean comparables.

4.2.1 Datos de entrada

Los datos de entrada del programa varían ligeramente respecto a los datos de inicio del proceso analítico. En este caso es necesario definir:

- Velocidad de corte, $v_c = 250 \text{ m/min}$
- Temperatura ambiente de taller, $\theta_o = 20^\circ\text{C}$
- Avance o ancho de viruta indeformada, a_c . Como se mencionó en el método anterior se han tomado 3 posibles avances: 0.25 mm, 0.30 mm y 0.50 mm.
- Coeficiente de rozamiento, μ . Este dato será distinto para cada secuencia, porque está directamente relacionado con el ángulo β , que se irá variando para generar diferentes situaciones.
- Coeficiente de transferencia de calor. Se deja el valor prefijado del programa $45 \frac{\text{N}}{\text{mm}^\circ\text{C}}$

4.2.2 Herramienta

El programa cuenta con un asistente para definir la geometría y el material de la herramienta. En todas las simulaciones se ha elegido como material Carburo de Wolframio (WC).

Para la geometría se ha mantenido las dimensiones por defecto, excepto el radio de punta de la herramienta que se ha fijado 0.05 mm. Se ha seleccionado el más pequeño posible porque el programa no permite que tenga forma de puntiaguda [2] .

El ángulo de inclinación de la herramienta, que se corresponde con el ángulo de desprendimiento, γ , se ha variado en cada secuencia. Los valores utilizados son los de la tabla 4.1.

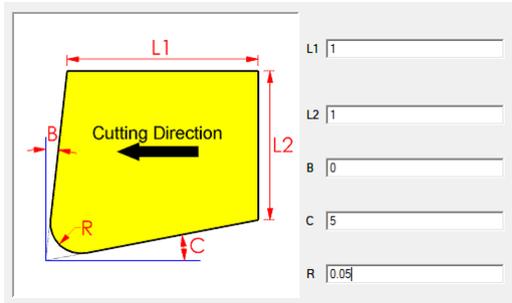


Figura 4.2 Asistente de configuración.

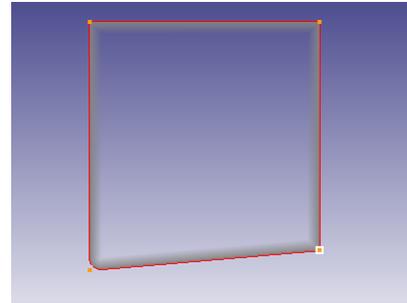


Figura 4.3 Herramienta definida.

4.2.3 Pieza

Para la pieza de trabajo también se ha utilizado el asistente del programa. Se ha creado una pieza rectangular con dimensiones suficientemente grandes para que en el proceso de corte se genere una viruta completa y se alcance un proceso estacionario.

El material de la pieza de trabajo es el mismo que en el método analítico. Esta aleación (Al-6061 T6) se encuentra incorporada en el programa por lo que no es necesario añadir sus propiedades [2].

Las dimensiones de la pieza se muestran en la figura inferior:

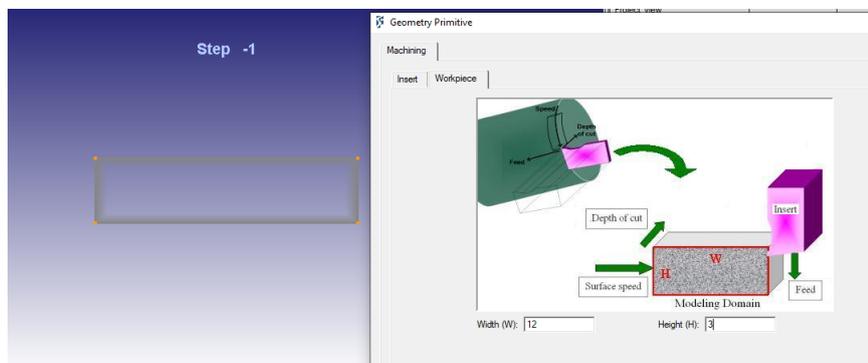


Figura 4.4 Asistente de configuración de la pieza de trabajo.

- $H=3$
- $W=12$

4.2.4 Metodología

Para resolver el problema por elementos finitos es necesario discretizar tanto la pieza como la herramienta. En este caso se ha dejado la malla por defecto que realiza el programa.

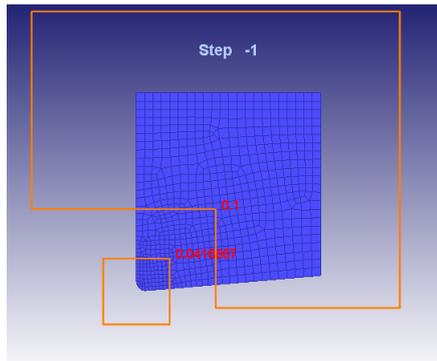


Figura 4.5 Mallado de la herramienta.

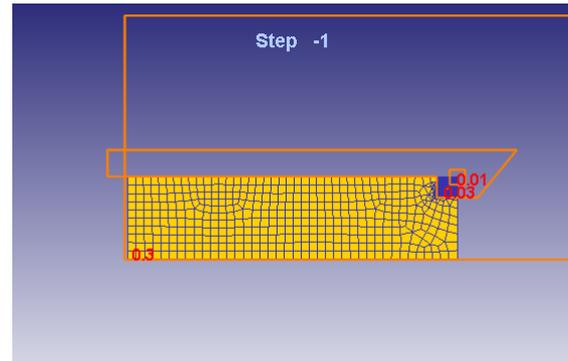


Figura 4.6 Mallado de la pieza.

El resto de las variables presentes en el proceso, se han empleado las preddefinidas. En la imagen inferior se muestra la configuración de corte:



Figura 4.7 Configuración de corte.

4.2.5 Resultados

A continuación se muestra la temperatura máxima alcanzada en la viruta durante el mecanizado obtenida por elementos finitos, para cada combinación de ángulos y avance.

Tabla 4.20 Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.25\text{mm}$.

Avance 0.25 mm	
Simulación	θ_m (°C)
Simulación 1	367
Simulación 2	384
Simulación 3	389
Simulación 4	405
Simulación 5	415
Simulación 6	420

Tabla 4.21 Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.30mm$.

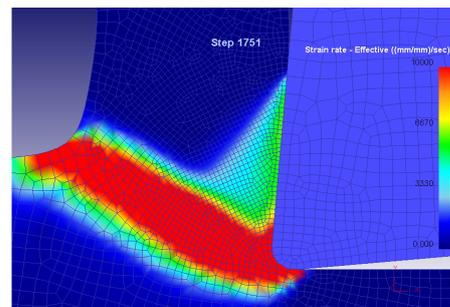
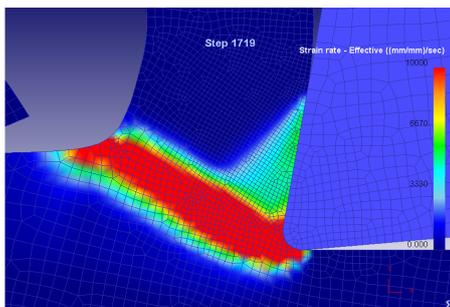
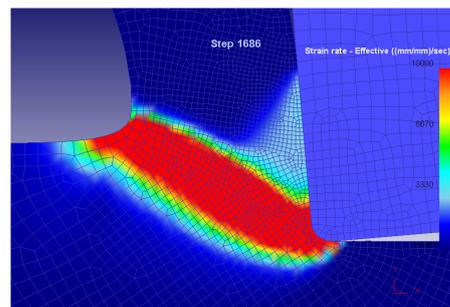
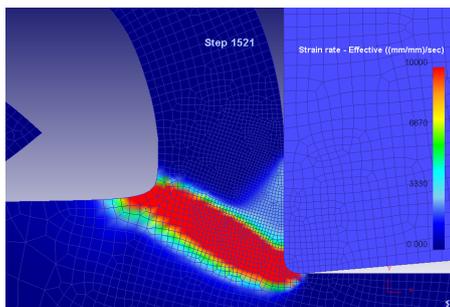
Avance 0.30 mm	
Simulación	θ_m (°C)
Simulación 1	371
Simulación 2	389
Simulación 3	394
Simulación 4	408
Simulación 5	418
Simulación 6	425

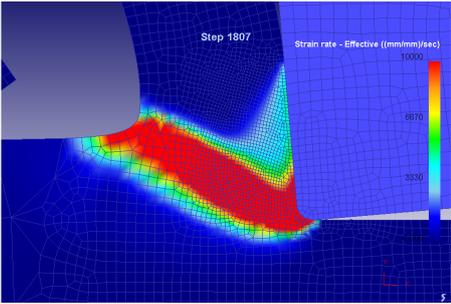
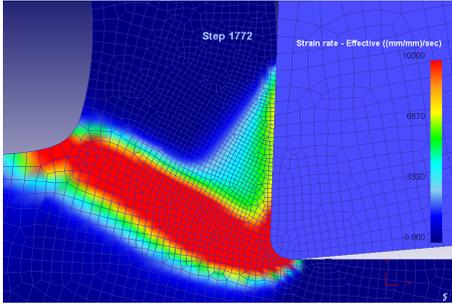
Tabla 4.22 Temperatura máxima obtenida por elementos finitos para $a_c = 0.50mm$.

Avance 0.50 mm	
Simulación	θ_m (°C)
Simulación 1	384
Simulación 2	400
Simulación 3	401
Simulación 4	414
Simulación 5	422
Simulación 6	425

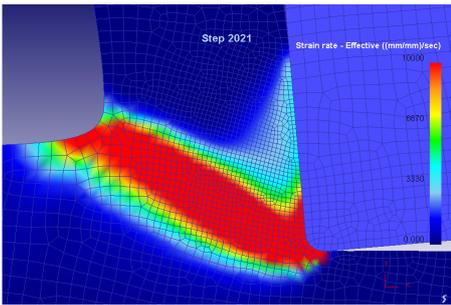
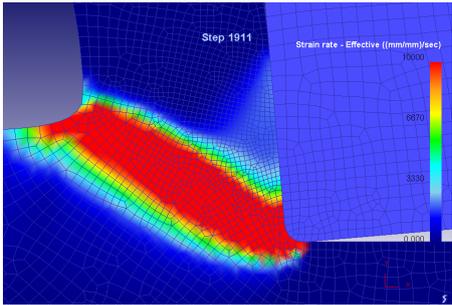
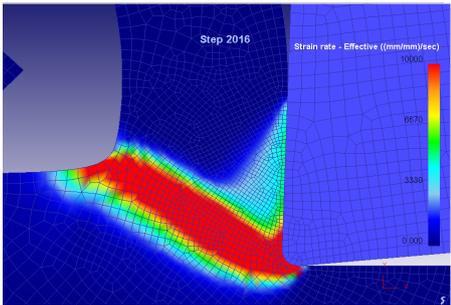
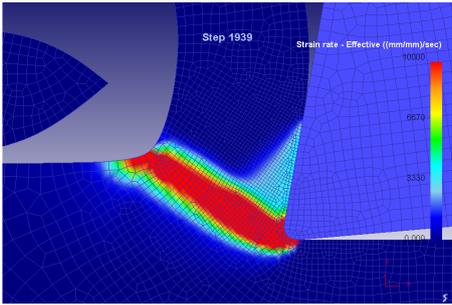
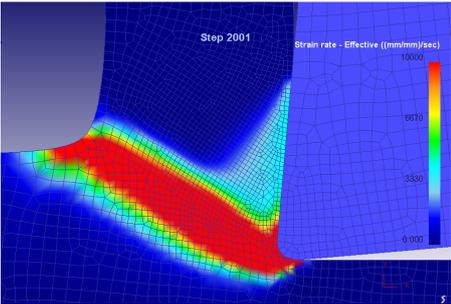
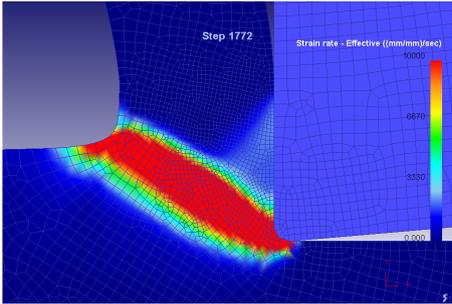
En la siguientes capturas del programa se muestra la zona de deformación primaria y secundaria generadas en el proceso de corte.

- Avance 0.25 mm

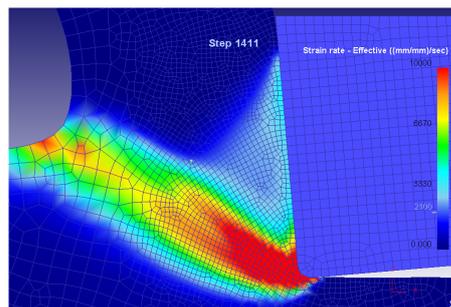
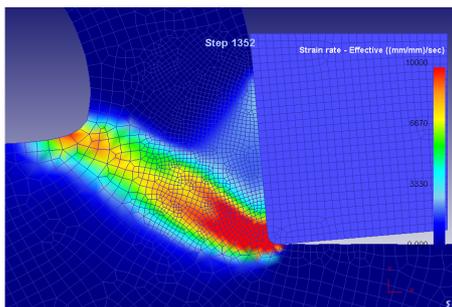
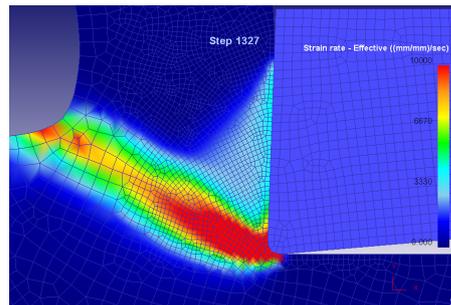
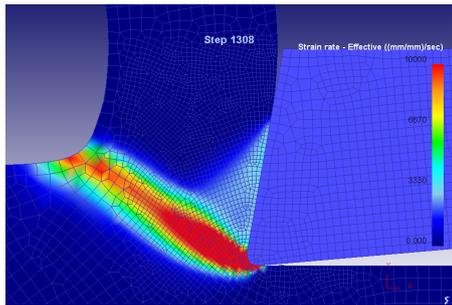
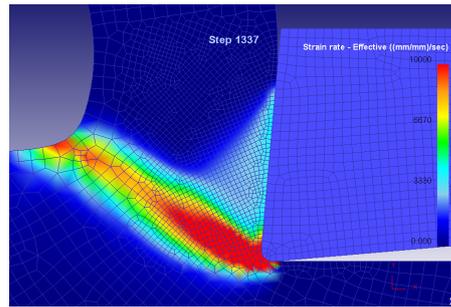
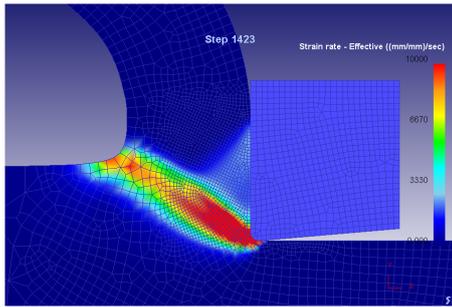




• Avance 0.30 mm



- Avance 0.50 mm



5 Análisis de resultados

En este apartado se estudian e interpretan los resultados obtenidos.

En el apartado anterior se han recogido los valores de temperatura máxima alcanzada en el viruta por ambos métodos y se puede observar cierta variación entre ambos resultados. En general, el valor analítico de temperatura es superior al valor obtenido por simulación. Además según aumenta el avance la diferencia de resultados se acentúa, por ejemplo para una avance de 0.5 mm la diferencia es muy superior que para 0.25 mm.

Con esto se puede establecer que la hipótesis de partida $w_o = 0.17$ no es muy acertada ni un valor constante para todas las simulaciones.

Si se observan las capturas del programa, la fuente de calor que se extiende dentro de la viruta (zona azul claro), tiene forma triangular y no rectangular como se estableció en las condiciones de contorno teóricas.

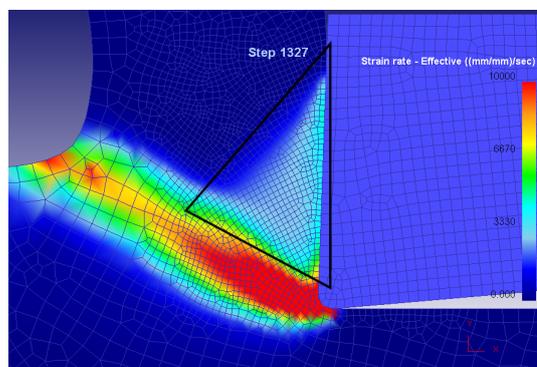


Figura 5.1 fuente de calor dentro de la viruta.

5.1 Análisis de la sección secundaria de deformación

5.1.1 Comparación de la superficie de la fuente de calor dentro de la viruta suponiendo deformación uniforme

A continuación se quiere estimar si la superficie de la fuente de calor dentro de la viruta tiene las mismas dimensiones para ambos procesos de cálculo (aunque tengan forma distinta). Para ello se ha ajustado el valor de w_o (fijado como 0.17 como hipótesis de partida) para que la temperatura máxima teórica y de elementos finitos coincidan:

$$\theta_{max} \text{ Analitica} = \theta_{max} \text{ Elementos Finitos}$$

Los valores obtenidos son:

Tabla 5.1 Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,25mm$.

Avance 0.25 mm	
Simulación	w_o
Simulación 1	0.17
Simulación 2	0.22
Simulación 3	0.16
Simulación 4	0.20
Simulación 5	0.20
Simulación 6	0.19

Tabla 5.2 Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,30mm$.

Avance 0.30 mm	
Simulación	w_o
Simulación 1	0.17
Simulación 2	0.23
Simulación 3	0.17
Simulación 4	0.22
Simulación 5	0.21
Simulación 6	0.21

Tabla 5.3 Ancho adimensional de la zona de calor en la viruta para $a_c = 0,50mm$.

Avance 0.50 mm	
Simulación	w_o
Simulación 1	0.20
Simulación 2	0.26
Simulación 3	0.21
Simulación 4	0.27
Simulación 5	0.28
Simulación 6	0.27

Según los resultados w_o aumenta para mayores avances, por lo que la diferencia con la hipótesis inicial es mayor. Esto hace que la diferencia entre ambos métodos para mayores avances también sea mayor como se ve en los resultados del apartado anterior.

Además se ha supuesto que la deformación es constante en toda la sección, es decir, el material se deforma lo mismo en los puntos en contacto con la herramienta que en puntos de la viruta más interiores.

La fuente de calor analítica tiene las siguientes dimensiones:

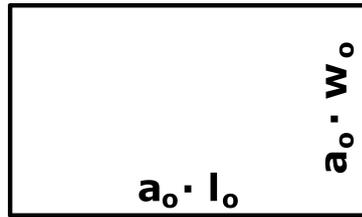


Figura 5.2 Esquema para la estimación de la superficie de la fuente de calor analíticamente.

$$A_r = l_f \cdot w_o \cdot a_o = l_o \cdot w_o \cdot a_o^2 \tag{5.1}$$

Para determinar el área de la fuente de calor de elementos finitos se han tomado 3 nodos y sus respectivas coordenadas en el plano. Con ellos y mediante vectores se ha podido calcular la longitud de los lados del triángulo rectángulo que se forma en el corte ortogonal.

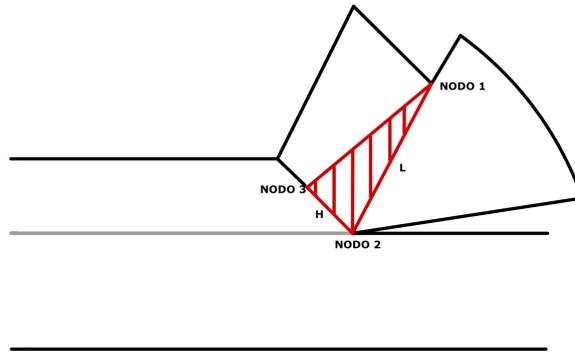


Figura 5.3 Esquema para la estimación de la superficie de la fuente de calor de elementos finitos.

Como se indica en la imagen, el área del triángulo será:

$$A_t = \frac{L \cdot H}{2} \tag{5.2}$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 5.4 Cálculo del área rectangular y triangular (suponiendo deformación uniforme) igualando la temperatura final de ambos métodos.

Avance 0.25 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.17	0.22	0.16	0.20	0.20	0.19
a_o (mm)	0.87	1.11	0.82	1.02	0.99	0.95
l_o (mm)	1.00	1.03	1.08	1.14	1.19	1.21
l_f (mm)	0.87	1.14	0.88	1.16	1.18	1.15
Área rectangular (mm^2)	0.13	0.28	0.12	0.24	0.23	0.21
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50
H (mm)	0.30	0.29	0.30	0.28	0.30	0.30
Área triangular (mm^2)	0.058	0.058	0.065	0.064	0.072	0.076
Comparación	2.23	4.81	1.79	3.79	3.25	3.74
Avance 0.30 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.17	0.23	0.17	0.22	0.21	0.21
a_o (mm)	0.85	1.13	0.85	1.09	1.07	1.07
l_o (mm)	1.00	1.03	1.08	1.14	1.19	1.21
l_f (mm)	0.86	1.16	0.91	1.24	1.27	1.30
Área rectangular (mm^2)	0.12	0.29	0.13	0.29	0.29	0.30
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.50	0.49	0.53	0.55	0.56	0.58
H (mm)	0.35	0.27	0.35	0.31	0.34	0.39
Área triangular (mm^2)	0.089	0.068	0.093	0.085	0.096	0.114
Comparación	1.41	4.34	1.40	3.43	3.05	2.64
Avance 0.50 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.20	0.26	0.21	0.27	0.28	0.27
a_o (mm)	0.98	1.32	1.07	1.36	1.38	1.36
l_o (mm)	1.00	1.03	1.08	1.14	1.19	1.21
l_f (mm)	0.98	1.36	1.15	1.55	1.64	1.65
Área rectangular (mm^2)	0.19	0.48	0.26	0.57	0.62	0.61
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86	0.94
H (mm)	0.62	0.47	0.61	0.51	0.56	0.60
Área triangular (mm^2)	0.26	0.18	0.27	0.22	0.24	0.28
Comparación	0.74	2.58	0.98	2.61	2.58	2.16

En la tabla se han comparado ambos resultados dividiendo el área rectangular entre la triangular siendo en la mayoría de los casos superior a la unidad, por lo que el área obtenida analíticamente es superior que la medida de la simulación. Sin embargo, se ve que los datos difieren bastante y no hay una regla clara que permita predecir la relación que guardan ambas superficies de calor en la viruta.

Asumiendo que el área analítica debe coincidir con el área de elementos finitos, se puede calcular el ancho adimensional como:

$$A_r = A_t \implies L_f \cdot a_o \cdot w_o = \frac{H \cdot L}{2} \quad (5.3)$$

$$w_o = \frac{H \cdot L}{2 \cdot L_f \cdot a_o} \quad (5.4)$$

El ancho adimensional obtenido es:

Tabla 5.5 Ancho adimensional igualando el área analítica y de elementos finitos.

Ancho adimensional w_o			
Simulación	Avance 0.25 mm	Avance 0.30 mm	Avance 0.50 mm
1	0,044	0,054	0,162
2	0,023	0,032	0,065
3	0,046	0,055	0,126
4	0,026	0,035	0,060
5	0,034	0,040	0,061
6	0,033	0,034	0,072

Como se puede ver en la tabla, si se igualan ambas superficies secundarias de deformación, el ancho adimensional analítico debería ser muy inferior al valor que se obtiene por igualación de temperaturas.

Si se toma ahora de referencia la longitud de contacto entre viruta y herramienta, denominado l_f para el caso analítico y L para la simulación. Se ha obtenido un valor de l_f muy superior al medido. Por ello, a continuación, se ha repetido el proceso fijando el valor de L como constante para el método analítico y prescindiendo de valor teórico. Con esto se pretende conseguir mayor similitud entre las áreas y cuestionar la exactitud de esa expresión.

5.1.2 Comparación de las superficies de calor suponiendo deformación uniforme en la viruta con l_f como constante

En este apartado se ha recalculado el área de la fuente de calor (analítica y simulada) pero ahora fijando en el proceso analítico la longitud de contacto entre pieza y herramienta medida del programa Deform. Esto implica recalcular el parámetro adimensional w_o para que la temperatura máxima alcanzada predicha por ambos procesos sea la misma.

En este caso se sigue asumiendo deformación uniforme en toda la sección como en el apartado anterior.

En la tabla inferior se muestran los datos obtenidos de esta variación:

Tabla 5.6 Cálculo del área rectangular y triangular suponiendo deformación uniforme y la longitud de contacto viruta-herramienta como constante para la misma temperatura final en ambos métodos.

Avance 0.25 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.22	0.28	0.21	0.26	0.26	0.24
a_o (mm)	1.12	1.41	1.06	1.32	1.30	1.21
l_f (mm)	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50
Área rectangular (mm^2)	0.099	0.16	0.098	0.16	0.16	0.15
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50
H (mm)	0.30	0.29	0.30	0.28	0.30	0.30
Área triangular (mm^2)	0.058	0.058	0.065	0.064	0.072	0.076
Comparación	1.70	2.78	1.51	2.54	2.24	1.94
Avance 0.30 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.21	0.27	0.21	0.27	0.27	0.25
a_o (mm)	1.03	1.36	1.03	1.34	1.33	1.27
l_f (mm)	0.50	0.49	0.53	0.55	0.56	0.58
Área rectangular (mm^2)	0.11	0.18	0.11	0.19	0.20	0.19
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.50	0.49	0.53	0.55	0.56	0.58
H (mm)	0.35	0.27	0.35	0.31	0.34	0.39
Área triangular (mm^2)	0.089	0.068	0.093	0.085	0.096	0.114
Comparación	1.19	2.71	1.20	2.28	2.05	1.66
Avance 0.50 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.21	0.29	0.23	0.30	0.30	0.30
a_o (mm)	1.03	1.44	1.14	1.49	1.52	1.49
l_f (mm)	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86	0.94
Área rectangular (mm^2)	0.17	0.32	0.23	0.38	0.40	0.42
<i>Área de la fuente de calor DEFORM</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86	0.94
H (mm)	0.62	0.47	0.61	0.51	0.56	0.60
Área triangular (mm^2)	0.26	0.18	0.27	0.22	0.24	0.28
Comparación	0.68	1.75	0.85	1.73	1.64	1.47

Tras esta modificación, se ve que la relación entre las áreas se aproxima. El cociente entre ambos continua siendo superior a la unidad, por lo que se mantiene mayor área analítica que por elementos finitos.

Sin embargo, observando esta relación sigue sin ser concluyente y no se puede apreciar ninguna tendencia, ya que para combinación de avance y de ángulos se obtiene un valor completamente diferente.

Si se analizan los datos, para mayores avances la relación entre áreas es más próxima que para avances menores, siendo para este caso el área analítica aproximadamente 1.5 veces superior a la simulada mientras que para avance 0.25 mm se obtiene entorno al doble.

Además se observa que el área medida de Deform aumenta con el avance. En cambio, en el área analítica apenas se perciben variaciones.

Si se supone que el área de deformación secundaria debe tener el mismo valor analíticamente que por elementos finitos. El ancho adimensional de la misma se calcularía como:

$$A_r = A_t \implies L \cdot a_o \cdot w_o = \frac{H \cdot L}{2} \quad (5.5)$$

$$w_o = \frac{H}{2a_o} \quad (5.6)$$

El ancho adimensional obtenido es:

Tabla 5.7 Ancho adimensional igualando el área analítica y de elementos finitos con la longitud de contacto viruta-herramienta como constante.

Ancho adimensional w_o			
Simulación	Avance 0.25 mm	Avance 0.30 mm	Avance 0.50 mm
1	0,132	0,172	0,156
2	0,101	0,101	0,174
3	0,140	0,172	0,160
4	0,104	0,117	0,177
5	0,116	0,129	0,199
6	0,125	0,153	0,193

El ancho adimensional obtenido en este caso es aproximadamente la mitad del valor se fija para obtener la misma temperatura final por elementos finitos que analíticamente.

5.1.3 Comparación de las superficies de calor suponiendo deformación no uniforme en la viruta con l_f como constante

En los apartados anteriores se ha supuesto en el cálculo del área, que la deformación en todos los nodos que abarca la región la deformación es la misma. Sin embargo, como es lógico, y según se observa en las capturas de elementos finitos, la deformación es superior en el lateral en contacto con la herramienta y esta disminuye progresivamente según se aleja de la cara de la herramienta.

En la imagen inferior se puede observar:

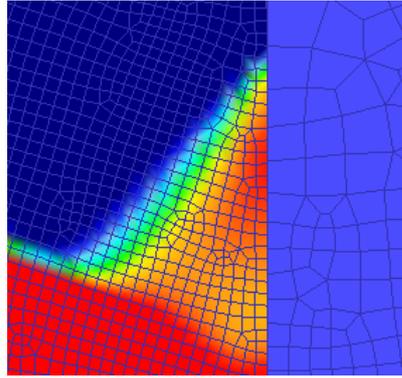


Figura 5.4 Vista de elementos finitos de la zona secundaria de deformación.

Por ello, se ha calculado el área rectangular analítica de forma diferencial de modo:

$$A_r = L \cdot w = L \cdot a_o \cdot w_o \quad (5.7)$$

$$A_r = \int_0^L \int_0^{h(x)} \left(1 - \frac{Ly}{Hx}\right) dx dy = \frac{H \cdot L}{4} \quad (5.8)$$

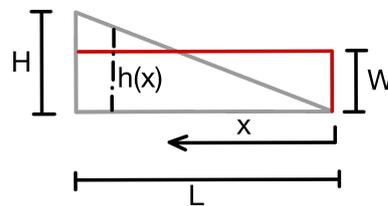


Figura 5.5 Comparación de la zona secundaria de deformación secundaria analítica y de elementos finitos.

Según la expresión superior el área del rectángulo analítico debería ser la mitad del la sección triangular obtenida por elementos finitos.

$$A_r = \frac{1}{2} \cdot A_t = \frac{1}{2} \cdot \frac{H \cdot L}{2} \quad (5.9)$$

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Tabla 5.8 Cálculo del área rectangular y triangular considerando deformación no uniforme en la sección .

Avance 0.25 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.22	0.28	0.21	0.26	0.26	0.24
a_o (mm)	1.12	1.41	1.06	1.32	1.30	1.21
L (mm)	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50
Área rectangular (mm^2)	0.099	0.16	0.098	0.16	0.16	0.15
<i>Área rectangular por integral</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.39	0.41	0.44	0.46	0.48	0.50
H (mm)	0.30	0.29	0.30	0.28	0.30	0.30
$(H \cdot L)/4$ (mm^2)	0.038	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
Comparación	3.39	5.56	3.01	5.07	4.49	3.88
Avance 0.30 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.21	0.27	0.21	0.27	0.27	0.25
a_o (mm)	1.03	1.36	1.03	1.34	1.33	1.27
L (mm)	0.50	0.49	0.53	0.55	0.56	0.58
Área rectangular (mm^2)	0.11	0.18	0.11	0.19	0.20	0.19
<i>Área rectangular por integral</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.50	0.49	0.53	0.55	0.56	0.58
H (mm)	0.35	0.27	0.35	0.31	0.34	0.39
$(H \cdot L)/4$ (mm^2)	0.04	0.03	0.05	0.04	0.05	0.06
Comparación	2.39	5.43	2.39	4.56	4.11	3.31
Avance 0.50 mm						
<i>Área de la fuente de calor teórica</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
w_o	0.21	0.29	0.23	0.30	0.30	0.30
a_o (mm)	1.03	1.44	1.14	1.49	1.52	1.49
l_f (mm)	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86	0.94
Área rectangular (mm^2)	0.17	0.32	0.23	0.38	0.40	0.42
<i>Área rectangular por integral</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
L (mm)	0.82	0.78	0.87	0.86	0.86	0.94
H (mm)	0.62	0.47	0.61	0.51	0.56	0.60
$(H \cdot L)/4$ (mm^2)	0.13	0.09	0.13	0.11	0.12	0.14
Comparación	1.36	3.50	1.71	3.46	3.27	2.95

Como se ve, con la suposición de deformación no uniforme hace que los resultados se alejen. Esto se debe a que se predice que el área rectangular debe ser la mitad de la triangular. En cambio, se ha observado que para la misma temperatura final, el área analítica es superior a la de elementos finitos.

Suponiendo que el área analítica debe coincidir con el área de elementos finitos, se puede calcular el ancho adimensional como:

$$A_r = A_t \implies L \cdot a_o \cdot w_o = \frac{H \cdot L}{4} \quad (5.10)$$

$$w_o = \frac{H}{4a_o} \quad (5.11)$$

El ancho adimensional obtenido es:

Tabla 5.9 Ancho adimensional obtenido igualando ambas áreas y considerando deformación no uniforme.

Ancho adimensional w_o			
Simulación	Avance 0.25 mm	Avance 0.30 mm	Avance 0.50 mm
1	0,066	0,086	0,078
2	0,051	0,050	0,087
3	0,070	0,086	0,080
4	0,052	0,059	0,089
5	0,058	0,065	0,100
6	0,062	0,077	0,096

Al igual que en el primer caso estudiado el ancho adimensional obtenido es muy inferior al ancho adimensional necesario para que las temperaturas finales sean coincidentes.

Debido a que no se sacan resultados concluyentes en el análisis de la sección, en los siguientes apartados se compara otros resultados en ambos métodos para obtener información de variables intermedias.

5.2 Análisis de las temperaturas finales igualando el área de la sección secundaria de método analítico y de elementos finitos

Como se ha comprobado en los apartados anteriores el área de calor que se extiende a la viruta (zona secundaria de deformación) no sigue ninguna correlación clara entre el método analítico y de elementos finitos.

En este apartado se ha calculado el ancho adimensional (w_o) de la sección analítica del tal forma que el área de ambas sea el mismo, suponiendo deformación uniforme y tomando L_f como constante. Tras determinar este valor lo que se pretende es obtener la temperatura máxima analítica y compararla con la obtenida de elementos finitos.

En la imagen posterior se muestra las dimensiones de cada sección:
Por tanto el ancho de la zona secundaria se obtiene:

$$A_r = A_t \quad (5.12)$$

$$L \cdot W = \frac{H \cdot L}{2} \implies W = \frac{L}{2} \quad (5.13)$$

5.2 Análisis de las temperaturas finales igualando el área de la sección secundaria de método analítico y de elementos finitos

El ancho de la sección analítica debe ser la mitad del ancho de la sección de elementos finitos. Además el ancho adimensional w_o se calcula como:

$$W = w_o \cdot a_o \implies w_o = \frac{W}{a_o} \quad (5.14)$$

Los resultados obtenidos son para cada simulación y avance:

Tabla 5.10 Ancho de la sección triangular y triangular para el mismo valor de sección.

Avance 0.25 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
W (mm)	0.20	0.20	0.22	0.23	0.24	0.25
w_o	0.22	0.28	0.21	0.26	0.26	0.24
Avance 0.30 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
W (mm)	0.25	0.25	0.26	0.27	0.28	0.29
w_o	0.21	0.27	0.21	0.27	0.27	0.25
Avance 0.50 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
W (mm)	0.41	0.39	0.44	0.43	0.43	0.47
w_o	0.21	0.29	0.23	0.30	0.30	0.30

El ancho adimensional obtenido se ha introducido como variable en el método analítico explicado en el capítulo 4 y se ha recalculado la temperatura máxima para compararla con la de simulación. Por tanto en este apartado lo que se pretende es calcular la temperatura final igualando el área de la sección secundaria. En cambio en los apartados anteriores el proceso era inverso, se calculaba w_o de tal forma que la temperatura de ambos métodos fuese igual y así comparar la sección de la zona secundaria de deformación.

Las temperaturas finales obtenidas por ambos métodos son:

Tabla 5.11 Comparación de temperatura final de ambos métodos para el mismo valor de sección de la zona secundaria de deformación.

Avance 0.25 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ Deform	367	384	389	405	415	425
θ Analítica	390.57	498.38	390.42	485.07	488.82	457.61
Avance 0.30 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ Deform	371	389	394	408	418	425
θ Analítica	354.88	466.67	366.24	466.64	472.96	449.08
Avance 0.50 mm						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ Deform	384	400	401	415	422	425
θ Analítica	306.13	413.91	319.81	423.7	444.14	410.16

A continuación se ha calculado el error relativo para obtener conclusiones. Para ello se ha asumido como valor "real" el obtenido por elementos finitos.

Tabla 5.12 Error relativo de la temperatura máxima.

Error relativo			
Simulación	Avance 0.25 mm	Avance 0.30 mm	Avance 0.50 mm
1	6,42 %	4,35 %	20,28 %
2	29,79 %	19,97 %	3,48 %
3	0,37 %	7,05 %	20, 25 %
4	19,77 %	14,37 %	2,10 %
5	17,79 %	13,15 %	5,25 %
6	7,67 %	5,67 %	3,49 %

Como se ve en la tabla el error máximo es del 30 % aproximadamente. Sin embargo, el resto son relativamente bajos. Por ello se puede afirmar que es raro obtener un error relativo superior al 30 % y se puede asumir un error por debajo del 20 %.

Con lo cual se puede decir que el método analítico permite conocer rápidamente el orden de magnitud de las temperaturas alcanzadas en el mecanizado.

El error relativo medio por avance es:

Tabla 5.13 Error relativo medio de la temperatura máxima.

Error relativo medio	
Avance 0.25 mm	13.96 %
Avance 0.25 mm	10.76 %
Avance 0.25 mm	9.14 %

Como se observa el error relativo, y por tanto la diferencia de temperaturas máximas imponiendo la misma sección de zona secundaria de deformación, disminuye con el avance.

El error relativo medio de todas las simulaciones es del 11,18 %.

5.3 Salto de temperatura de la Zona Primaria de Deformación

La temperatura máxima alcanzada es la suma de la temperatura de taller, el salto de temperatura producido en la zona de corte o zona primaria y el salto de temperatura de la zona secundaria.

En el modelo idealizado, la zona primaria se asume que es a una línea que corresponde con la generación de la viruta. Sin embargo, como se observa en las capturas realizadas del programa, esta zona en realidad es una región, donde se alcanza los máximos valores de deformación (color rojo).

En este apartado se han comparado los valores de temperatura de esta zona. El modelo analítico determina el salto medio de temperatura de la zona primaria mediante la expresión 4.13. Esta temperatura alcanzada esta condicionada por el calor generado, la fracción de calor transmitido a la pieza de trabajo y las características del material.

En el caso de elementos finitos, para determinar esta temperatura media se ha obtenido la temperatura de cada nodo del mallado y su deformación. Posteriormente se ha filtrado estos puntos para solo considerar aquellos que estén por encima de cierto valor de deformación (ya que en esta zona se alcanza la máxima deformación) y por otro lado se ha limitado la temperatura entre un valor mínimo y máximo para asegurar que el punto perteneciese a esta región.

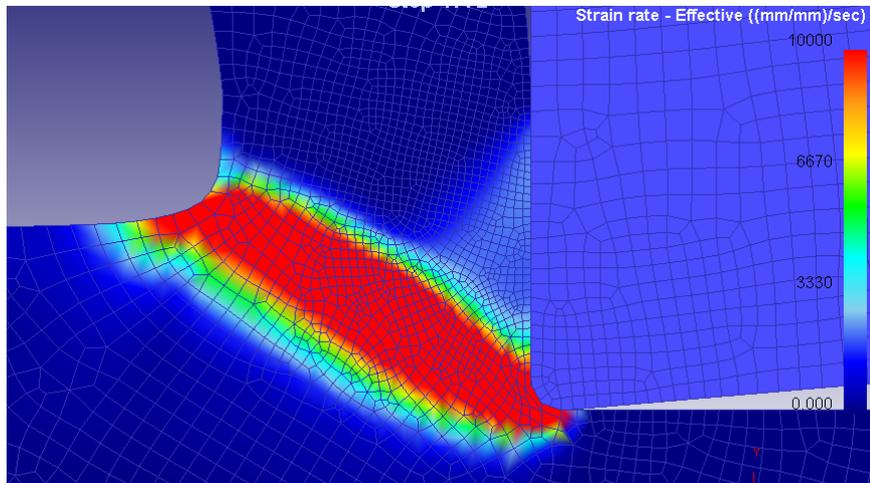


Figura 5.6 Zona de Deformación Primaria.

Los parámetros de filtro se han personalizado para cada simulación en función de la gráfica mostrada en la animación. Por último, se ha calculado la temperatura con la media aritmética de los puntos que cumplieren ambas premisas y así obtener la temperatura media de la zona de deformación primaria

En la tabla inferior se muestra una comparación de las temperaturas obtenidas.

Tabla 5.14 Comparación del salto de temperatura correspondiente a la primera zona de deformación por ambos métodos.

Temperatura media de la zona de deformación primaria						
<i>Avance 0.25 mm</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ_s (°C) Boothroyd	272.86	260.23	258.77	245.27	236.85	228.38
θ_s (°C) DEFORM	238.62	212.87	205.68	231.81	235.25	250.56
Comparación	1.14	1.23	1.23	1.06	1.00	0.91
<i>Avance 0.30 mm</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ_s (°C) Boothroyd	329.22	339.05	349.30	359.08	359.48	359.85
θ_s (°C) DEFORM	257.36	244.39	243.87	230.48	222.55	215.64
Comparación	0.78	0.72	0.70	0.64	0.62	0.60
<i>Avance 0.50 mm</i>						
Simulación	1	2	3	4	5	6
θ_s (°C) Boothroyd	257.36	244.39	243.87	230.48	222.55	215.64
θ_s (°C) DEFORM	237.88	240.40	268.47	236.19	258.39	265.22
Comparación	1.08	0.96	0.93	0.87	0.84	0.89

Como se observa en la tabla, los valores que se obtiene son bastante similares entre la teoría y la realidad (elementos finitos). Se puede decir que la expresión del cálculo de la temperatura se asemeja bastante al valor obtenido en elementos finitos.

Tabla 5.15 Error relativo del salto de temperatura de la zona primaria de deformación.

Error relativo			
Simulación	Avance 0.25 mm	Avance 0.30 mm	Avance 0.50 mm
1	14,35 %	8,19 %	16,08 %
2	22,25 %	1,66 %	5,19 %
3	25,81 %	9,17 %	0,22 %
4	5,80 %	2,41 %	13,44 %
5	0,25 %	13,85 %	18,40 %
6	8,85 %	18,70 %	9,32 %

5.4 Fracción de calor transmitida a la pieza de trabajo

En este apartado se explica la forma de calculo de la fracción de calor en elementos finitos. En el proceso analítico es posible obtener este valor directamente a través de la siguiente expresión:

$$\Gamma = \frac{0.41}{(R \cdot \tan\phi)^{0.53}} \quad (5.15)$$

Esta expresión proviene del ajuste de la gráfica 2.7.

El calor transmitido a la viruta $(1 - \Gamma)$ permite calcular el salto de temperatura en la zona primaria.

$$\theta_s = \frac{(1 - \Gamma) \cdot P_s}{\rho \cdot c \cdot a_c \cdot a_w \cdot v_c} \tag{5.16}$$

En el caso de la simulación este valor no es posible obtenerlo directamente, por lo que para estimarlo se ha realizado el proceso inverso.

Partiendo de la expresión anterior y despejando la fracción de calor (Γ) se obtiene:

$$\Gamma = 1 + \frac{\theta_s \cdot \rho \cdot c \cdot v_c \cdot a_c \cdot a_w}{P_s} \tag{5.17}$$

Γ depende de las características del material (ρ, c) , del avance (a_c) y de la velocidad de corte (v_c) . Estos datos son constantes y son variables de entrada.

También depende del calor generado en la zona primaria de deformación, por lo que para calcularlo es necesario conocer el valor de la fuerza de corte (paralela al movimiento relativo pieza-herramienta) y de la fuerza de empuje del programa (perpendicular al corte).

Estas fuerzas se pueden extraer directamente del programa:



Figura 5.7 Menú de Deform 2.0.

El programa proporciona gráficas como las inferiores en las que se muestra como varía la fuerza en el eje X (fuerza de corte) y en el eje Y (fuerza de empuje) frente al tiempo.

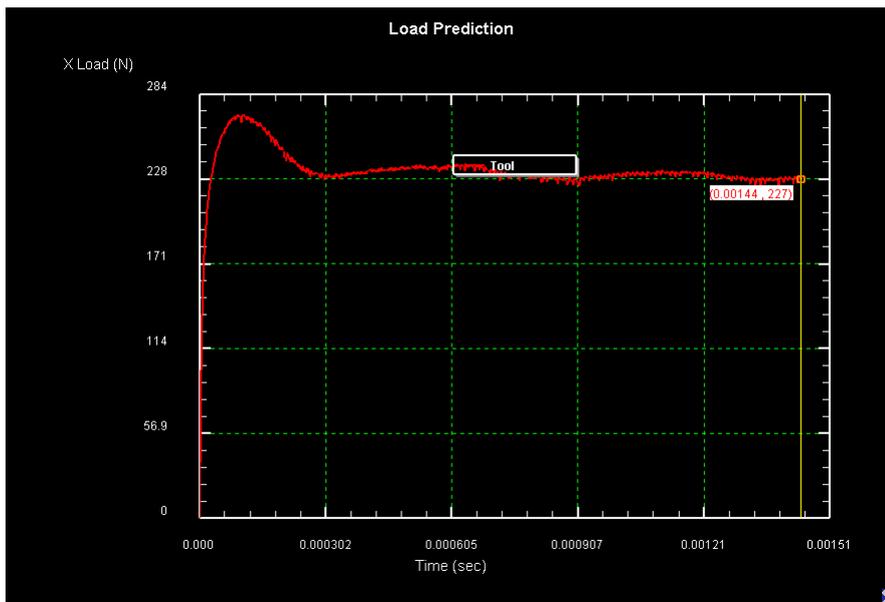


Figura 5.8 Variación de la fuerza de corte frente al tiempo.

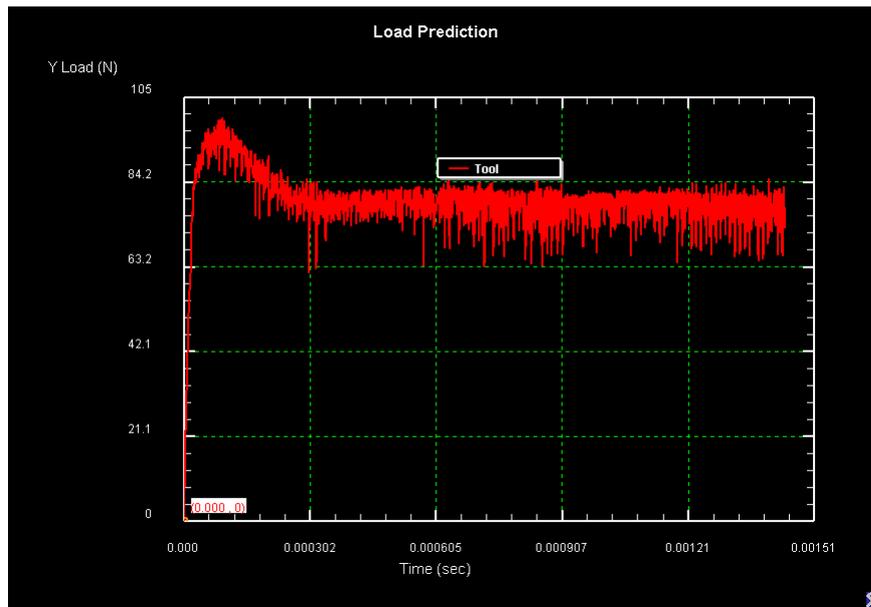


Figura 5.9 Variación de la fuerza de empuje frente al tiempo.

En el caso de la fuerza de corte vemos que el valor máximo se alcanza al poco de empezar el corte y que luego se alcanza un valor prácticamente constante. En cambio la fuerza de empuje es mucho más variable y no se aprecia tan claramente este valor estacionario. Para ambos casos se han exportado los datos de la gráfica y se ha calculado el valor medio para cada avance y combinación de ángulos, ya que ambos varían para cada simulación.

Conocido el valor de F_c , F_t y γ (dato de entrada) es posible calcular el valor de la fuerza de fricción F_f y la fuerza normal F_n resolviendo el sistema:

$$F_n = \cos\gamma \cdot F_c - \sin\gamma \cdot F_t \quad (5.18)$$

$$F_f = \sin\gamma \cdot F_c + \cos\gamma \cdot F_t \quad (5.19)$$

Tabla 5.16 Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.25\text{mm}$.

Avance 0.25 mm					
Simulación	F_c (N)	F_t (N)	F_n (N)	F_f (N)	μ
Simulación 1	217.49	56.54	217.49	56.54	0.26
Simulación 2	207.47	41.31	197.14	76.71	0.39
Simulación 3	231.68	78.79	237.67	58.30	0.25
Simulación 4	222.64	59.97	216.57	79.15	0.37
Simulación 5	231.41	72.11	228.75	80.14	0.35
Simulación 6	244.91	95.17	252.27	73.46	0.29

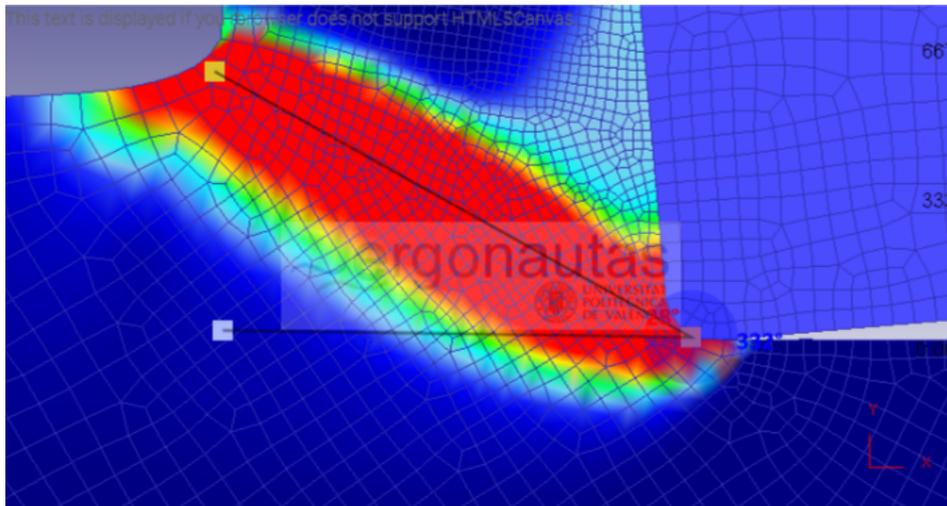
Tabla 5.17 Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.30mm$.

Avance 0.30 mm					
Simulación	F_c (N)	F_t (N)	F_n (N)	F_f (N)	μ
Simulación 1	253.93	58.48	253.93	58.48	0.23
Simulación 2	238.57	38.68	228.23	72.52	0.35
Simulación 3	269.29	83.24	275.52	59.50	0.22
Simulación 4	257.29	60.73	251.02	82.92	0.33
Simulación 5	266.79	74.53	264.02	83.79	0.32
Simulación 6	283.33	101.61	291.11	76.53	0.26

Tabla 5.18 Fuerzas presentes en el mecanizado obtenidas por elementos finitos para $a_c = 0.50mm$.

Avance 0.50 mm					
Simulación	F_c (N)	F_t (N)	F_n (N)	F_f (N)	μ
Simulación 1	399.66	65.31	399.66	65.31	0.16
Simulación 2	368.00	30.14	357.17	93.58	0.26
Simulación 3	428.18	107.14	435.89	69.42	0.16
Simulación 4	396.36	63.63	389.30	97.93	0.25
Simulación 5	414.30	86.62	411.02	101.02	0.25
Simulación 6	44.50	131.71	454.28	92.47	0.20

Se ha medido el ángulo de desprendimiento (ϕ) del programa para obtener el valor real. Esta medida se ha realizado sobre la propia imagen y utilizando la herramienta online [4]

**Figura 5.10** Ejemplo de medida del ángulo de deslizamiento (ϕ).

Al tratarse de una herramienta visual, hay que considerar el error que conlleva y los valores obtenidos tienen cierta variación frente al valor teórico fijado.

En las tablas inferiores se comparan ambos ángulos:

Tabla 5.19 Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.25mm$.

Avance 0.25 mm		
Simulación	ϕ DEFORM	ϕ Boothroyd
Simulación 1	32°	32.88°
Simulación 2	30°	29.69°
Simulación 3	28°	26.48°
Simulación 4	24°	23.29°
Simulación 5	20°	20.08°
Simulación 6	19°	16.89°

Tabla 5.20 Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.30mm$.

Avance 0.30 mm		
Simulación	ϕ DEFORM	ϕ Boothroyd
Simulación 1	32°	32.88°
Simulación 2	30°	29.69°
Simulación 3	28°	26.48°
Simulación 4	24°	23.29°
Simulación 5	20°	20.08°
Simulación 6	19°	16.89°

Tabla 5.21 Comparación del ángulo de deslizamiento obtenido por elementos finitos y analíticamente para $a_c = 0.50mm$.

Avance 0.50 mm		
Simulación	ϕ DEFORM	ϕ Boothroyd
Simulación 1	33°	32.88°
Simulación 2	30°	29.69°
Simulación 3	27°	26.48°
Simulación 4	33°	23.29°
Simulación 5	24°	20.08°
Simulación 6	21°	16.89°

Los valores analíticos permanecen constantes, no dependen del avance ni del ángulo de deslizamiento. En cambio en elementos finitos estos no permanecen fijos y varían para cada avance, por lo que probablemente el coeficiente de rozamiento aparente será distinto al teórico.

Por trigonometría se obtiene el ancho de viruta deformada (a_o)

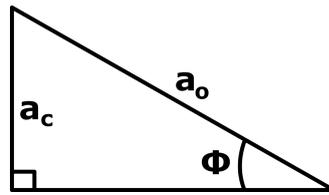


Figura 5.11 Triángulo que relaciona los anchos de viruta.

$$a_o = \frac{a_c}{\sin \phi} \quad (5.20)$$

Y por continuidad, la velocidad de la viruta:

$$a_o \cdot v_o = a_c \cdot v_c \Rightarrow v_o = \frac{a_c \cdot v_c}{a_o} \quad (5.21)$$

Con los datos anteriores es posible calcular las potencias presentes en el mecanizado y así finalmente obtener P_s

$$P_f = F_f \cdot v_o \quad (5.22)$$

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (5.23)$$

$$P_s = P_c - P_f \quad (5.24)$$

Por último se obtiene la fracción de calor transmitida a la pieza a través de la expresión (5.17) empleando el valor de P_s calculado.

En la siguiente tabla se recogen los valores de potencia obtenidos y la fracción de calor:

Tabla 5.22 Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$.

Avance 0.25 mm			
Potencias presentes en el mecanizado			
<i>Simulación</i>	P_f	P_c	P_s
Simulación 1	124.85	906.19	781.34
Simulación 2	159.81	864.45	704.63
Simulación 3	114.04	965.35	851.30
Simulación 4	134.14	927.68	793.54
Simulación 5	114.20	964.21	850.00
Simulación 6	99.65	1020.45	920.80
Fracción de calor transmitida a la pieza de trabajo			
<i>Simulación</i>	Γ_{DEFORM}	$\Gamma_{Boothroyd}$	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.23	0.12	1.88
Simulación 2	0.24	0.13	1.82
Simulación 3	0.39	0.14	2.78
Simulación 4	0.26	0.15	1.73
Simulación 5	0.30	0.17	1.81
Simulación 6	0.31	0.18	1.72

Tabla 5.23 Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25mm$.

Avance 0.30 mm			
Potencias presentes en el mecanizado			
<i>Simulación</i>	P_f	P_c	P_s
Simulación 1	129.11	1058.04	928.92
Simulación 2	165.66	994.03	828.37
Simulación 3	116.39	1122.02	1005.64
Simulación 4	146.02	1072.03	926.01
Simulación 5	136.42	1111.61	975.19
Simulación 6	93.23	1180.53	1087.30
Fracción de calor transmitida a la pieza de trabajo			
<i>Simulación</i>	Γ_{DEFORM}	$\Gamma_{Boothroyd}$	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.23	0.11	2.02
Simulación 2	0.12	0.12	1.02
Simulación 3	0.19	0.13	1.50
Simulación 4	0.23	0.14	1.65
Simulación 5	0.20	0.15	1.32
Simulación 6	0.26	0.17	1.58

Tabla 5.24 Potencia y fracción de calor transmitida a la pieza calculada por elementos finitos para $a_c = 0.25\text{mm}$.

Avance 0.50 mm			
Potencias presentes en el mecanizado			
<i>Simulación</i>	P_f	P_c	P_s
Simulación 1	148.20	1665.27	1517.07
Simulación 2	194.96	1533.32	1338.36
Simulación 3	131.31	1784.09	1652.77
Simulación 4	222.24	1651.48	1429.24
Simulación 5	171.20	1726.23	1555.03
Simulación 6	138.08	1852.06	1713.98
Fracción de calor transmitida a la pieza de trabajo			
<i>Simulación</i>	Γ_{DEFORM}	$\Gamma_{Boothroyd}$	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.31	0.08	3.70
Simulación 2	0.18	0.09	2.02
Simulación 3	0.30	0.10	3.12
Simulación 4	0.21	0.11	2.00
Simulación 5	0.27	0.11	2.33
Simulación 6	0.39	0.13	3.10

La potencia de corte necesaria, lógicamente, es proporcional al avance, lo que hace que a mayor avance, P_s también aumente. En cuanto a fracción de calor transmitida predicha por Deform es mayor que la analítica, por lo que se transmite menor calor a la viruta que lo predicho por el método de analítico.

5.5 Coeficiente de rozamiento

Otro parámetro en el que se ha prestado atención ha sido el coeficiente de rozamiento. Para ambos procesos (analítico y de elementos finitos), es un parámetro de entrada.

En el proceso teórico este valor se conserva ya que los cálculos se realizan tomando este valor de referencia, que es diferente para cada situación ya que está directamente relacionado con el ángulo β .

El proceso en Deform, este dato es una de las variables de entrada que pide el programa. Para que sea comparable en cada caso se ha dado el valor que corresponda en función del proceso manual.

Si se calcula este coeficiente de rozamiento como la relación de la fuerza normal (F_n) y la fuerza de fricción (F_f), se observa que el coeficiente de rozamiento aparente no coincide con el valor fijado, es decir no se mantiene constante. Estas fuerzas no se miden directamente del programa pero se obtienen a través de la fuerza de corte y de empuje que se puede obtener el valor medio del programa.

$$\tan\beta = \frac{F_f}{F_n} = \mu \quad (5.25)$$

Los valores obtenidos como se ve en la tabla inferior son inferiores a los fijados inicialmente:

Tabla 5.25 Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.25mm$.

Avance 0.25 mm			
Coeficiente de rozamiento			
<i>Simulación</i>	μ <i>DEFORM</i>	μ <i>teórico</i>	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.259	0.268	0.97
Simulación 2	0.389	0.577	0.67
Simulación 3	0.245	0.364	0.67
Simulación 4	0.365	0.700	0.52
Simulación 5	0.350	0.754	0.46
Simulación 6	0.291	0.700	0.42

Tabla 5.26 Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.30mm$.

Avance 0.25 mm			
Coeficiente de rozamiento			
<i>Simulación</i>	μ <i>DEFORM</i>	μ <i>teórico</i>	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.230	0.268	0.86
Simulación 2	0.348	0.577	0.59
Simulación 3	0.216	0.364	0.59
Simulación 4	0.330	0.700	0.47
Simulación 5	0.317	0.754	0.42
Simulación 6	0.263	0.700	0.38

Tabla 5.27 Comparación del coeficiente de rozamiento analítico y aparente para $a_c = 0.50mm$.

Avance 0.25 mm			
Coeficiente de rozamiento			
<i>Simulación</i>	μ <i>DEFORM</i>	μ <i>teórico</i>	<i>Relación</i>
Simulación 1	0.163	0.268	0.61
Simulación 2	0.262	0.577	0.45
Simulación 3	0.159	0.364	0.44
Simulación 4	0.252	0.700	0.36
Simulación 5	0.246	0.754	0.33
Simulación 6	0.204	0.700	0.29

Comparando μ analítico con el aparente, se ve que en general este último es aproximadamente la mitad del teórico.

Esto se explica porque en el corte se generan 2 tipos de presiones: presiones normales y tangenciales.

El coeficiente de rozamiento relaciona ambas según la expresión:

$$P_t = \mu \cdot P_N \quad (5.26)$$

Las presiones normales en el mecanizado son muy grandes, sobretodo en la punta de la herramienta. Esto provoca que la tensión tangencial aumente. El material impone un valor máximo de presión tangencial, según sus propiedades, antes de que se generen fracturas.

El aumento de la presión tangencial, hace que la viruta se adhiera a la herramienta y deslice sobre si misma. Cuando se alcanza el límite de tensión tangencial, estas no aumentan y las presiones normales no varían, lo que provoca que el coeficiente de rozamiento disminuya.

El coeficiente de rozamiento en el cálculo de Boothroyd no varía con el avance, es decir, ambos son datos de entrada independientes. El coeficiente de rozamiento solo depende del ángulo β .

Como se ve en los resultados tabulados, el valor de elementos finitos el coeficiente de rozamiento obtenido si depende del avance porque para los mismos datos de entrada variando únicamente el avance (a_c), el coeficiente de rozamiento cambia. Además también se puede ver que para la misma situación (mismo número de simulación), el coeficiente de rozamiento disminuye cuanto mayor sea el avance. Esto se debe a que como el espesor de la viruta indeformada es mayor, la superficie de plastificación también lo es y por tanto, la viruta tiene más superficie para deslizar sobre si misma.

6 Conclusiones

A continuación se exponen las principales conclusiones:

- Se ha hecho un estudio por elementos finitos del problema térmico en el corte ortogonal.
- Se observa que la zona secundaria de deformación simulada por elementos finitos es triangular y no rectangular como establece el método analítico.
- Asumiendo deformación uniforme en la zona secundaria, se ha calculado el área rectangular usando la longitud de contacto analítica (L_f) y el ancho de la zona se ha ajustado para que las temperaturas máximas obtenidas por ambos procesos coincidan.

El área analítica es superior a la de elementos finitos, en algún caso hasta 4 veces.

- Se ha observado que el valor de la longitud de contacto analítica es aproximadamente el doble a la longitud de contacto de elementos finitos.

La longitud de contacto analítica está determinada por el ángulo ϕ . Se ha comparado los valores analíticos con el ángulo ϕ en la simulación y las diferencias no son significativas, siendo aproximadamente de 1 a 3 grados.

- Se ha recalculado el área de la zona secundaria de deformación suponiendo de nuevo una deformación uniforme. En este caso se ha calculado el área rectangular tomando la longitud de contacto de elementos finitos y el ancho de la sección se ha ajustado para que la temperatura máxima de ambos métodos coincida.

Tras esta variación, el área analítica continua siendo superior a la de elementos finitos pero la diferencia se reduce y en la mayoría de los casos el área rectangular es aproximadamente el doble a la triangular.

- El área analítica aumenta con el avance. En cambio, el área de elementos finitos permanece prácticamente constante.
- Se ha asumido la zona secundaria de deformación como una sección de deformación no uniforme y se ha obtenido una mayor diferencia entre ellas. Esto se debe a que la integral predice que el área rectangular es menor que el área triangular. El área analítica es superior a la simulada en algún caso hasta 4 veces por lo que asumir que la deformación es uniforme no influye en el cálculo de la superficie
- El salto de temperatura en la zona primaria se ha calculado como la media aritmética de la temperatura alcanzada en la zona de mayor deformación de elementos finitos. La relación entre el valor analítico y el simulado es próximo a la unidad para todos los avances estudiados.

- La fracción de calor transmitida a la pieza calculada a través de elementos finitos es el doble que la fracción de calor obtenida analíticamente. En cambio, para mayores avances, esta diferencia aumenta, aproximándose al triple la relación entre ambas.
- El coeficiente de fricción aparente es aproximadamente la mitad del coeficiente de rozamiento analítico.
- El coeficiente de rozamiento aparente disminuye con el avance.
- Se puede asumir un error relativo medio entorno al 20% en el método de cálculo de temperatura máxima de mecanizado recogido por Boothroyd.
El error relativo de la temperatura disminuye para mayor ancho de viruta indeformada.

Bibliografía

- [1] Miquel Portabella Castany, *Un procedimiento de cálculo de estructuras por el método de elementos finitos con error prefijado utilizando refinamiento de malla adaptativo*, (2014).
- [2] Scientific Forming Technologies Corporation, *Deform 3d version 6.1 (sp1) user's manual*, 2007.
- [3] Francisco de Asís Fernández Ocaña, *Guía práctica elementos finitos*, (2020).
- [4] Jose Antonio Diego-Mas, *Ruler - medición de ángulos en fotografías*.
- [5] Luis V. Bohórquez Jiménez, *Formulario para problemas de mecanizado, procesos de fabricación aeronáutica. etsi*, (2017).
- [6] Winston A. Knight and Geoffrey Boothroyd, *Fundamentals of metal machining and machine tools*, 2019.
- [7] Angelos P. Markopoulos, *Machining processes*, 2012.
- [8] Eduardo Frias Valero, *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos. tesis doctoral.*, (2004).