



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN TORNEADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Alumno: Daniel Conde Álvarez

Tutor: Prof. D. Rubén Dorado Vicente

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Febrero, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don RUBÉN DORADO VICENTE, tutor del Trabajo Fin de Grado titulado:
SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UN TORNEADO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS,
que presenta DANIEL CONDE ÁLVAREZ, autoriza su presentación para defensa y
evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Febrero de 2016

El alumno:

Los tutores:

Daniel Conde Álvarez

D. Rubén Dorado Vicente

RESUMEN

Las fuerzas de corte y el tiempo en un proceso de arranque de material son clave para su optimización. El tiempo puede medirse con un cronometro, pero las fuerzas no pueden obtenerse de una forma tan sencilla. Este trabajo estudia la aplicación del método de los elementos finitos para estimar las fuerzas de corte en un proceso de torneado. Se han realizado ocho ensayos virtuales y reales con diferentes condiciones de corte sobre un tocho de aluminio (AA 6063) con una herramienta monofilo de acero rápido (HSS M2). En los ensayos reales se han medido las fuerzas por medio de una plataforma dinamométrica. Posteriormente se ha comparado la estimación numérica con los datos de fuerzas del análisis teórico y las fuerzas medidas experimentalmente.

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO DEL TRABAJO	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1. Tecnología del mecanizado.....	3
2.2. Condiciones de corte.....	4
2.3. Maquinabilidad.	6
2.3.1. Tecnología de las herramientas de corte.	6
2.3.1.1. Características formales.	7
2.3.1.2. Herramientas monofilos.....	7
2.3.2. Temperatura y desgaste.	9
2.3.3. Vida de las herramientas.	16
2.3.4. Materiales para herramientas.....	17
2.3.5. Modelos de corte.....	18
2.4. Problema a estudiar. Modelo del plano de cizallamiento.	19
2.4.1. Formación de la viruta.....	23
3. ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE CORTE	25
3.1. Modelos analíticos. Modelos de corte ortogonal.	25
3.1.1. Relaciones de fuerza y ecuación de Merchant.	25
3.1.1.1. Consideraciones de la ecuación de Merchant.	29
3.1.2. Segunda Ley de Merchant.	29
3.1.3. Potencia y energía de corte en el mecanizado.	31
3.2. FEM (Finite Element Methods). Método de elementos finitos.	33
3.2.1. Tipos de métodos numéricos empleados en análisis mecánico.	34
3.2.2. Método de elementos finitos.	34
3.2.2.1. Pasos para el análisis por elementos finitos en programas comerciales.....	35
3.2.2.2. Programas para la aplicación del FEM.	36
3.2.2.3. Definición de elemento finito.	37
3.2.2.4. Formulación en la discretización.....	37
4. MÉTODO EMPÍRICO O EXPERIMENTAL Y MATERIALES.....	39
4.1. Material de la pieza de trabajo.	39
4.2. Material de la herramienta.....	40
4.3. Máquina-herramienta.	41

4.3.1. Pasos para la configuración de la operación de torneado.	43
4.4. Medición de las fuerzas de corte. Dinamómetro.	44
5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MEDIANTE FEM	47
5.1. Metodología del modelado en Abaqus/CAE.....	47
5.1.1. Pantalla principal.	47
5.1.2. Geometría.	48
5.1.3. Preprocesador. Material del tocho de material.....	52
5.1.4. Preprocesado. Ensamblaje del modelo.....	57
5.1.5. Preprocesado. Creación del Step.	58
5.1.6. Preprocesado. Interacción del modelo.....	59
5.1.7. Preprocesado. Condiciones de contorno.	59
5.1.8. Preprocesado. Mallado del modelo.....	61
5.1.9. Procesado. Creación del “job”.....	63
5.1.10. Postprocesado. Visualización de resultados.....	64
6. CÁLCULOS, SIMULACIONES Y ENSAYOS.....	67
6.1. Cálculo analítico.	67
6.1.1. Ley de Ernst y Merchant.	67
6.1.2. Segunda Ley de Merchant.	67
6.1.3. Resultado analíticos.....	67
6.2. Fuerzas de corte mediante FEM.	69
6.3. Cálculo experimental.....	70
7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. VALIDACIÓN.....	71
7.1. Ensayo 1.	71
7.2. Ensayo 2.	73
7.3. Ensayo 3.	74
7.4. Ensayo 4.	76
7.5. Ensayo 5.	77
7.6. Ensayo 6.	79
7.7. Ensayo 7.	80
7.8. Ensayo 8.	81
7.9. Influencia de los parámetros de corte.	83
7.9.1. Método analítico.....	83
7.9.1.1. Ernst y Merchant.....	83

7.9.1.2 Ley de Merchant.	85
7.9.2. Método numérico.	86
8. CONCLUSIÓN.....	89
9. BIBLIOGRAFÍA.....	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1-Condiciones de corte en un torneado (Groover, 2007).	4
Figura 2.2.-Características formales de la herramienta de corte (Ing.Mecanizado, 2014)	7
Figura 2.3.-Ángulos característicos de la herramienta en el corte ortogonal (Groover, 2007)	9
Figura 2.4.-Temperatura en el corte (Kalpakjian, 2002)	9
Figura 2.5-Distribución de temperaturas en el corte (Kalpakjian, 2002)	10
Figura 2.6.-Diagrama de una herramienta desgastada. Tipos de desgaste (Groover, 2007)	11
Figura 2.7-Desgaste en cráter (Groover, 2007).....	12
Figura 2.8.-Desgaste de la superficie de incidencia (Groover, 2007)	12
Figura 2.9-Mecanismo de desgaste. Adhesión.....	13
Figura 2.10-Mecanismo de desgaste. Abrasión.	13
Figura 2.11-Mecanismo de desgaste. Difusión.....	14
Figura 2.12.-Mecanismo de desgaste. Reacciones químicas.	14
Figura 2.13.-Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte (Groover, 2007)	15
Figura 2.14.-Modelos de corte (Ing. Mecanizado, 2014)	19
Figura 2.15.-Esquema de la formación de viruta (Groover, 2007).....	19
Figura 2.16.-Zonas de cizalladura (Groover, 2007).	20
Figura 2.17.-Corte ortogonal (Groover, 2007)	21
Figura 2.18.-Aproximación del torneado al corte ortogonal (Groover, 2007)	22
Figura 2.19.-Tipos de formación de virutas en el corte (Groover, 2007)	24
Figura 3.1.-Fuerzas sobre la viruta y herramienta en el corte ortogonal (Groover, 2007)	25
Figura 3.2.-Diagrama de fuerzas en el corte ortogonal (Groover, 2007)	26
Figura 3.3.-Segunda Ley de Merchant (Ing. Mecanizado, 2014).....	29
Figura 3.4.-Representación del ángulo de cizalladura (Ing. Mecanizado, 2014).	30
Figura 3.5.-Zona de cizalladura en el corte real (Groover, 2007)	31
Figura 3.6.-Factor de corrección para la energía específica (Groover, 2007)	33
Figura 3.7.-Diagrama de evolución de elementos finitos (ASEN 5007, 2016)	35
Figura 3.8.-Ajuste del método numérico para el torneado (ASEN 5007, 2016).....	35
Figura 4.1.-Material de trabajo. AA6063	40
Figura 4.2.-Esquema de las distintas partes de un torno (Kalpakjian, 2002).....	42
Figura 4.3.-Caja de velocidades del torno.	43
Figura 4.4.-Caja de avances del torno.....	43
Figura 4.5.-Carros principal, transversal y orientable del torno.	44
Figura 4.6.-Amplificador de carga Kistler 5070A.	45
Figura 5.1.-Pantalla principal Abaqus 6.13-1.....	48
Figura 5.2.-Sketch de la pieza de trabajo.	49
Figura 5.3.-Partición en la pieza de trabajo.	50

Figura 5.4.-Sketch de la herramienta de trabajo.....	51
Figura 5.5.-Geometría de la herramienta y punto de referencia (RP).....	51
Figura 5.6.-Velocidad de deformación del aluminio a T ambiente (CDAL, 2007)	53
Figura 5.7.-Definición del material Abaqus.	54
Figura 5.8.-Constantes de Johnson-Cook en Abaqus.	56
Figura 5.9.-Asignación de la sección a la pieza de trabajo.....	57
Figura 5.10.-Ensamblaje del modelo en Abaqus.	58
Figura 5.11.-Creación del Step en Abaqus.....	58
Figura 5.12.-Definición del contacto entre la pieza de trabajo y herramienta.	59
Figura 5.13.-Condiciones de contorno de la pieza de trabajo en Abaqus.	60
Figura 5.14.-Condiciones de contorno de la herramienta en Abaqus.....	60
Figura 5.15.-Semillado del modelo de trabajo en Abaqus.	61
Figura 5.16.-Detalle del semillado progresivo en Abaqus.	62
Figura 5.17.-Mallado del modelo en Abaqus.	62
Figura 5.18.-Creación del Job de análisis en Abaqus.	63
Figura 5.19.-Monitor de análisis del modelo en Abaqus.	64
Figura 5.20.-Visualización de resultados en Abaqus.....	64
Figura 5.21.- Representación de resultados.....	65
Figura 7.1.-Fuerza de corte del ensayo 1. Abaqus.....	72
Figura 7.2.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 1.	72
Figura 7.3.-Fuerza de corte del ensayo 2. Abaqus.....	73
Figura 7.4.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 2.	74
Figura 7.5.-Fuerza de corte del ensayo 3. Abaqus.....	75
Figura 7.6.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 3.	75
Figura 7.7.-Fuerza de corte del ensayo 4. Abaqus.....	76
Figura 7.8.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 4.	77
Figura 7.9.-Fuerza de corte del ensayo 5. Abaqus.....	78
Figura 7.10.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 5.....	78
Figura 7.11.-Fuerza de corte del ensayo 6. Abaqus.....	79
Figura 7.12.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 6.....	79
Figura 7.13.-Fuerza de corte del ensayo 7. Abaqus.....	80
Figura 7.14.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 7.....	81
Figura 7.15.-Fuerza de corte del ensayo 8. Abaqus.....	82
Figura 7.16.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 8.....	82
Figura 7.17.- Influencia de la profundidad de pasada. Método E&M.	83
Tabla 7.18.-Influencia del avance. Método E&M.	84
Tabla 7.19.- Influencia de la velocidad de corte. Método E&M.....	84
Figura 7.20.- Influencia de la profundidad de pasada. Método 2 Ley Merchant.	85
Figura 7.21.- Influencia del avance. Método 2 Ley Merchant.	85
Figura 7.22.- Influencia de la velocidad. Método 2 Ley Merchant.....	86
Figura 7.23.- Influencia de la profundidad de pasada. Método numérico.	87
Figura 7.24.- Influencia del avance. Método numérico.	87
Figura 7.25.- Influencia de la velocidad de corte. Método numérico.....	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.-Clave de conversión en el corte ortogonal (Groover, 2007)	23
Tabla 3.1.-Constante C para distintos materiales (Groover, 2007).....	30
Tabla 3.2.-Valores de energía específica para distintos materiales (Groover, 2007) 32	
Tabla 3.3.-Lista de software comerciales de elementos finitos.....	36
Tabla 4.1.-Composición química del AA6063.....	39
Tabla 4.2.-Propiedades físicas del AA6063.....	39
Tabla 4.3.-Composición química en % del HSS M2.	41
Tabla 4.4.- Propiedades físicas del HSS M2.	41
Tabla 5.1.-Unidades consistentes.	52
Tabla 5.2.-Valores de n y k.....	53
Tabla 5.3.-Comportamiento plástico del material.Ley de Ludwik-Hollomon.	54
Tabla 5.4.-Constantes empírica del material para Johnson-Cook.....	56
Tabla 6.1.-Fuerzas de corte analíticas.	68
Tabla 6.2.-Parámetros de corte en Abaqus CAE.....	69
Tabla 6.3-Parámetros de corte usados en el taller.	70

1. ANTECEDENTES Y OBJETIVO DEL TRABAJO

Uno de los procesos de arranque de material más importante, por el número de componentes industriales de revolución, es el torneado. Pese a su simplicidad, la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso (avance, velocidad de corte, uso de taladrina, material, tipo y material de herramienta, etcétera) dificultan su estudio. Por esta razón, los primeros estudios sobre el proceso de corte se basan en modelos simplificados como el modelo de corte ortogonal. Este modelo ha sido utilizado por varios autores para desarrollar teorías entre los que destacan Ernst y Merchant..

A finales del siglo XX, la potencia de los ordenadores permitieron analizar y simular problemas de Ingeniería en programas informáticos específicos, llamando a estos software CAE (Computer Aided Engineering). Los ordenadores han aportado un medio eficaz para resolver la multitud de incógnitas, y por lo tanto ecuaciones que se plantean.

El presente trabajo se centra en crear un modelo de elementos finitos con el software Abaqus 6.13-1, que simule un proceso de corte convencional. Por su simplicidad y facilidad para su ensayo real, se ha simulado un corte ortogonal, y se ha comparado las fuerzas estimadas con las obtenidas mediante dos modelos analíticos, y una serie de ensayos experimentales.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Tecnología del mecanizado.

Los procesos de arranque de viruta son una familia de operaciones de conformado en los que se elimina material de una pieza en bruto hasta que se obtiene la geometría final que se quiere conseguir (Groover, 2007).

Este trabajo se centra en la rama más importante de los procesos de arranque de material: el mecanizado convencional, en el que el material es arrancado por medio de herramientas (cuchillas, brocas, fresas, etc.) en forma de cuña que penetra en la pieza removiendo el material en forma de tiras más o menos continuas, que se denominan virutas.

Los procesos básicos de este procedimiento son: torneado, fresado, taladrado, limado aserrado y brochado. En concreto, el estudio se ha aplicado a un proceso de torneado.

Desde el punto de vista comercial y tecnológico, las operaciones de conformado tienen gran importancia debido a las siguientes razones (Groover, 2007):

- Amplia gama de materiales de trabajo.
- Variedad de formas y características geométricas.
- Precisión dimensional.
- Acabados superficiales de gran calidad.

También presentan desventajas, como:

- Desperdicio de material.
- Consumo de tiempo.

En el torneado, una máquina-herramienta hace funcionar una herramienta, con el objeto fundamental de transformar físicamente un cuerpo, ya sea en su geometría o en sus dimensiones. Aunque en la práctica es usual utilizar este nombre para designar las máquinas que se emplean para conformar materiales por arranque de viruta, también deben considerarse las de deformación sin separación de material como los martinets o las prensas de embutir, así como cizallas o guillotinas. Las máquinas herramienta convencionales necesitan solamente una persona, para la carga y descarga de piezas, cambio de herramienta de corte o definir las condiciones

de corte. Muchas máquinas actuales son automatizadas por medio de control numérico.

2.2. Condiciones de corte.

Los movimientos fundamentales de una máquina herramienta son:

- Movimiento de corte.
- Movimiento de avance.
- Movimiento de penetración.

La regulación de estos movimientos se realiza por medio de condiciones de corte, que deben ser elegidos cuidadosamente en cada caso, y que son los siguientes:

- Velocidad de corte (v_c), expresada en m/min, y define la velocidad relativa entre la pieza y la herramienta en el sentido del corte, regulando el movimiento de corte.
- Velocidad de avance (f), expresada en mm/vuelta, regula el movimiento de avance.
- Profundidad de pasada (p), expresada en mm, regula el movimiento de penetración.

Como se ha comentado más arriba, este presente trabajo, se centra en el proceso de torneado convencional, y las condiciones de corte, se muestran en la Figura 2.1:

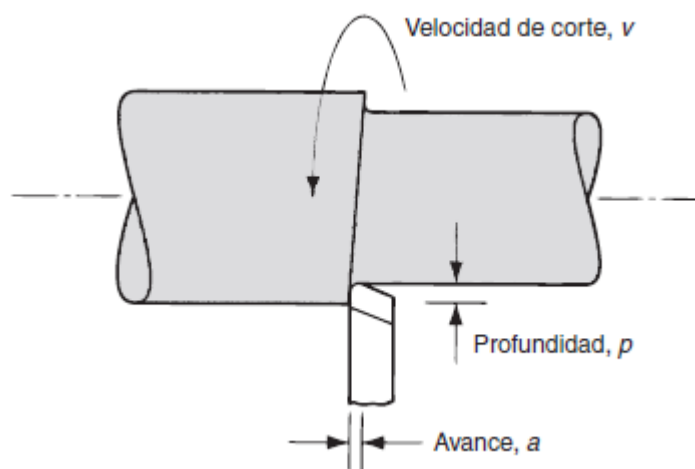


Figura 2.1-Condiciones de corte en un torneado (Groover, 2007).

La velocidad de rotación en el torneado se relaciona con la velocidad de corte requerida en la superficie cilíndrica de la pieza de trabajo por la ecuación

$$N = \frac{v_c}{\pi D} \quad (1)$$

donde N es la velocidad de rotación, v_c es la velocidad lineal de corte y D es el diámetro inicial de la pieza.

Para calcular el tiempo que tarda la herramienta en mecanizar una revolución de la pieza, podemos establecer una relación entre la velocidad lineal de corte y la longitud de la revolución (longitud de una circunferencia):

$$v_c = \pi D N \quad (2)$$

$$L = \pi D \quad (3)$$

Entonces:

$$t(\text{min}) = \frac{L}{v_c} = \frac{\pi D}{\pi D N} = \frac{1}{N} \quad (4)$$

El avance f se suele expresar en mm/rev, aunque puede convertirse en avance lineal expresándolo en mm/min:

$$f_r = f N \quad (5)$$

La profundidad de pasada p , espesor de material que se arranca durante el mecanizado. El avance y la profundidad permiten calcular la sección de viruta arrancada A' :

$$A' = f p \quad (6)$$

La velocidad de corte influye en la vida de la herramienta, así como en el acabado superficial de la pieza mecanizada.

- A menor velocidad de corte, mayor duración del filo de la herramienta.
- A mayor velocidad de corte, deterioro rápido.

El problema de optimización de las condiciones de corte viene determinado por la elección de esta velocidad, con mínimos costos de mecanización. Influyen características del material, herramienta de corte y geometría.

2.3. Maquinabilidad.

2.3.1. Tecnología de las herramientas de corte.

Las operaciones de mecanizado se realizan usando herramientas de corte. Las herramientas de corte deben cumplir las siguientes condiciones:

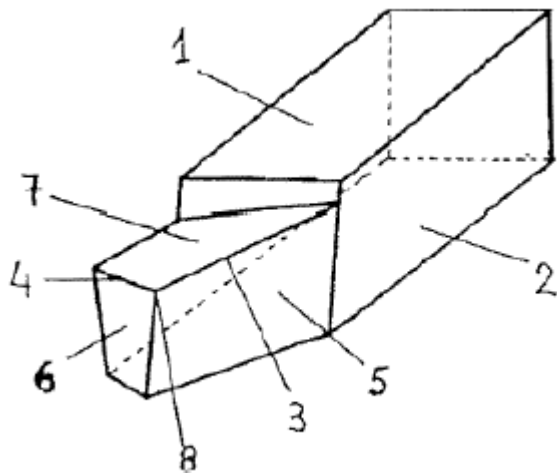
- Arrancar la mayor cantidad de material en el menor tiempo posible.
- Obtener un acabado superficial y precisión dimensional de calidad.
- Poder mecanizar gran variedad de materiales.
- Realizar el trabajo con el menor número de afilados.
- Realizar las operaciones al menor coste.

Las herramientas de corte se pueden clasificar en:

- Monofilo de corte único o cuchillas.
- Multifilo de corte múltiple.

2.3.1.1. Características formales.

En la Figura 2.2 se considera una cuchilla elemental en forma de barra. Está constituida fundamentalmente por dos partes: mango o cuerpo (se fija en el portaherramientas) y punta (formada por distintas superficies y aristas). A continuación se muestra la normalización de los nombres de las distintas partes de la herramienta:



1. Cuerpo de la herramienta.
2. Plano base.
3. Arista principal de corte (filo).
4. Arista secundaria (contrafilo).
5. Superficie de incidencia principal.
6. Superficie de incidencia secundaria.
7. Superficie de desprendimiento.
8. Punta de la herramienta.

Figura 2.2.-Características formales de la herramienta de corte (Ing.Mecanizado, 2014)

2.3.1.2. Herramientas monofilo.

En la mayoría de los análisis de procesos de mecanizado de arranque de viruta se toman como modelo para el estudio de la formación de viruta en el corte ortogonal, modelos bidimensionales, y para ellos se utiliza herramientas conocidas como herramientas monofilo.

Las partes que se pueden diferenciar en una herramienta monofilo son:

- Superficie de desprendimiento o de ataque. Superficie por donde la viruta resbala durante el proceso.
- Superficie de incidencia o flanco. Superficie que queda frente a la superficie de corte.
- Arista de corte principal o filo. Realiza el corte y es la intersección entre la superficie de desprendimiento y la superficie de incidencia.

Podemos diferenciar tres ángulos característicos en la herramienta como se puede observar en la siguiente figura (Figura 2.3):

- Ángulo de desprendimiento o ataque (α). Formado por la cara de desprendimiento y la normal a la superficie mecanizada. El valor de este ángulo es el de mayor importancia, ya que la viruta resbala sobre la cara de desprendimiento, siendo ella la que determina el ángulo de cizallamiento. Si aumentamos α , aumenta la facilidad para eliminar la viruta, disminuyendo por tanto los esfuerzos de corte, la energía consumida y el calor desarrollado. Un aumento excesivo de α provoca un debilitamiento del filo. A menor valor, aumenta la resistencia de la herramienta y el acabado será mejor debido a que no se adhiere la viruta.
- Ángulo de incidencia o de alivio (γ). Formado por la cara de incidencia y la superficie mecanizada. Permite el trabajo de la herramienta evitando la interferencia con la pieza. Si el valor de este ángulo es pequeño, dificulta la penetración de la herramienta en la pieza, originando un excesivo rozamiento entre la superficie de incidencia y la pieza, que provoca un calentamiento excesivo que reduce la dureza. Si se aumenta excesivamente reduce considerablemente el rozamiento entre la pieza y la herramienta provocando un aumento de la fragilidad del filo.
- Ángulo de filo (β). Formado por las superficies de desprendimiento e incidencia de la herramienta. A mayor ángulo de filo, mayor es la resistencia de la herramienta. Si disminuimos este ángulo, facilitamos el proceso de corte, disminuyendo la resistencia de la herramienta.

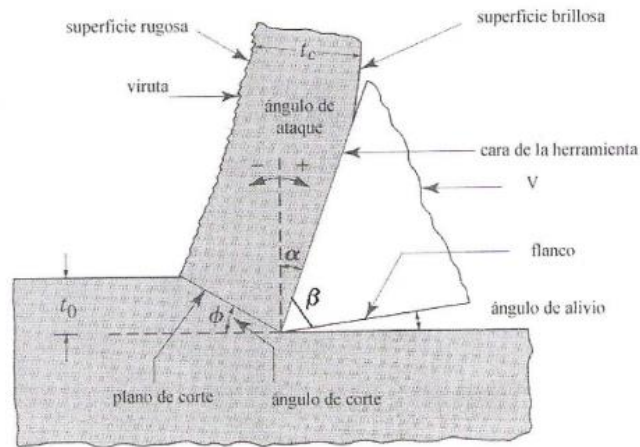


Figura 2.3.-Ángulos característicos de la herramienta en el corte ortogonal (Groover, 2007)

2.3.2. Temperatura y desgaste.

El proceso de arranque de viruta genera elevadas temperaturas que influyen sobre el desgaste de las herramientas y sobre el rozamiento entre ambas. El calor es generado principalmente por la energía mecánica necesaria para producir la deformación de la viruta y en menor medida por el rozamiento. Cuando un material es deformado plásticamente, la mayor parte de la energía utilizada se transforma en calor, y en el arranque de material, la viruta que se obtiene es sometida a grandes deformaciones (Kalpakjian, 2002), como se puede observar en la Figura 2.4:

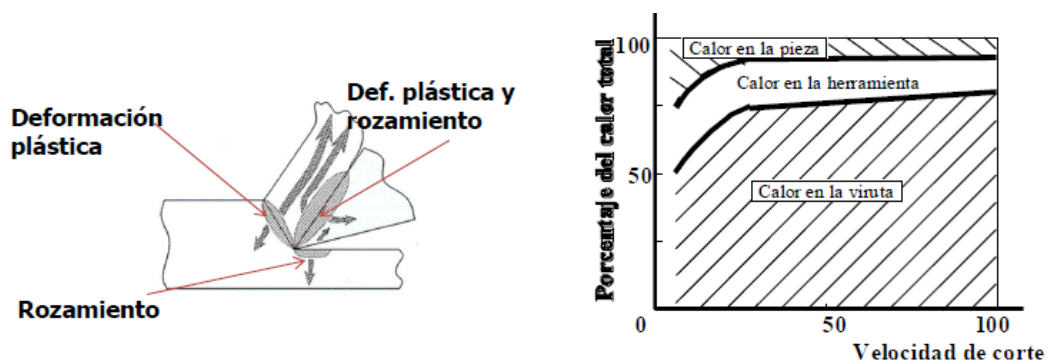


Figura 2.4.-Temperatura en el corte (Kalpakjian, 2002)

En general:

- La velocidad de corte es el parámetro que mayor influencia tiene. A mayor velocidad de corte, mayor es la temperatura que se alcanza.
- El material de la pieza es influente, pues a mayor resistencia y dureza mayor la temperatura.
- La temperatura del filo de la herramienta disminuye al aumentar el tamaño del mango de la herramienta, debido a que hay mayor conducción de calor.
- El uso de fluidos de corte reduce la temperatura durante el proceso (taladrina).

En la siguiente figura (Figura 2.5) se muestra una distribución típica en la zona de corte. Como se puede observar, hay una serie de gradientes térmicos, y que la temperatura máxima se presenta en la mitad del recorrido por la cara de la herramienta. Esta distribución de temperaturas, depende de, entre otros factores ya nombrados como la velocidad de corte, de conductividad térmica y calor específico.

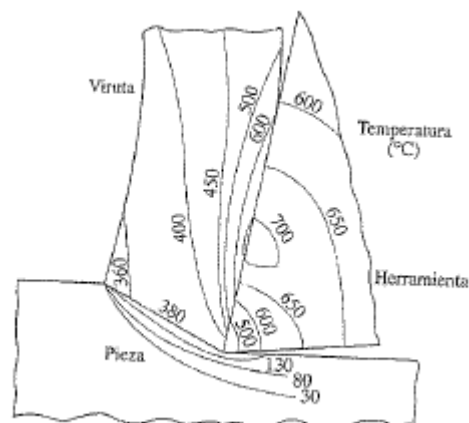


Figura 2.5-Distribución de temperaturas en el corte (Kalpakjian, 2002)

La temperatura es un factor que influye en el desgaste de la herramienta. El desgaste de la herramienta suele ocurrir en dos partes de la herramienta principalmente como: en la parte superior de la superficie de inclinación y en el flanco o superficie de incidencia. En la Figura 2.6 se muestran los distintos tipos de desgaste que define Groover (2007).

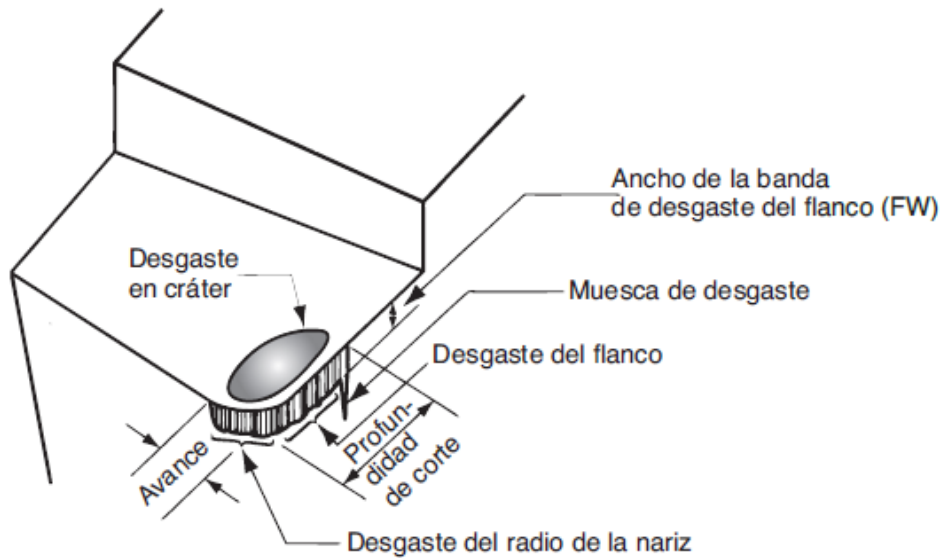


Figura 2.6.-Diagrama de una herramienta desgastada. Tipos de desgaste (Groover, 2007)

Hay dos tipos principales de desgaste de la herramienta:

- Desgaste en cráter. Se presente en la superficie de ataque de la herramienta, y afecta al proceso de corte debido a que cambia la geometría de interfase entre la pieza y la herramienta. Puede medirse por su profundidad o por su área. Puede observarse en la Figura 2.7. Los factores que influyen sobre el desgaste en cráter son:
 - La temperatura en la interfase herramienta-viruta.
 - Esfuerzos elevados.

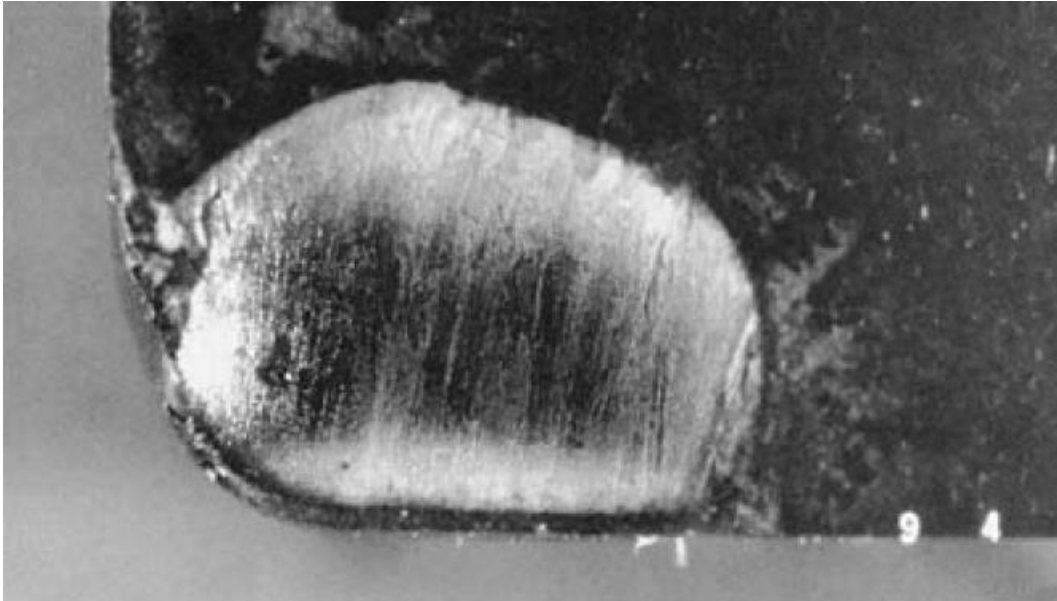


Figura 2.7-Desgaste en cráter (Groover, 2007)

- Desgaste del flanco. Ocurre en el flanco o superficie de incidencia, afectando a las propiedades del material de la herramienta y la pieza. Se cuantifica por el tamaño de la banda de desgaste. Puede observarse en la Figura 2.8. Los factores que provocan este desgaste son:
 - Rozamiento entre la superficie mecanizada y la superficie de incidencia.
 - Elevadas temperaturas durante el proceso de corte.

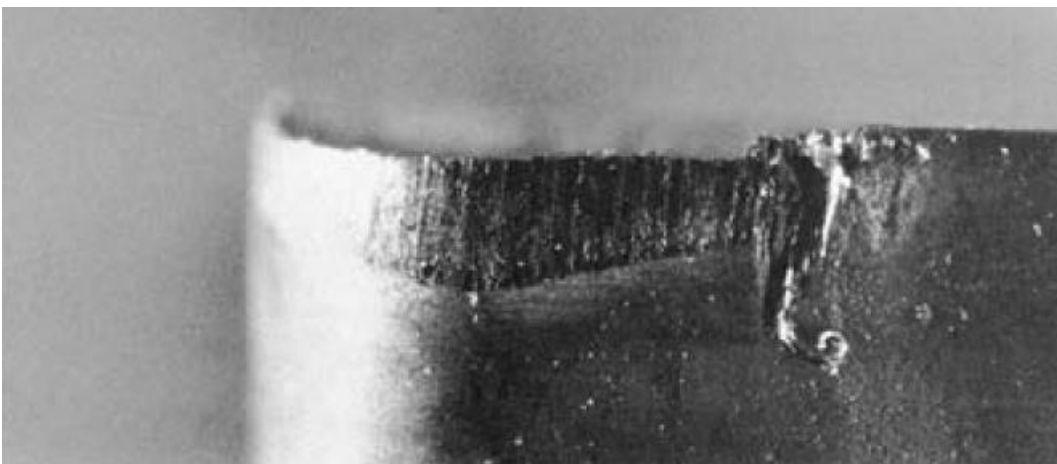


Figura 2.8.-Desgaste de la superficie de incidencia (Groover, 2007)

Los mecanismos que generan desgaste debido a fricción herramienta-viruta y herramienta-pieza son:

- Adhesión. Ocasionado porque durante la fricción viruta-herramienta, pequeños fragmentos de la viruta se sueldan a la superficie de desprendimiento, y cuando estas uniones se fracturan, pueden arrancar pequeñas partículas de la herramienta (Figura 2.9).

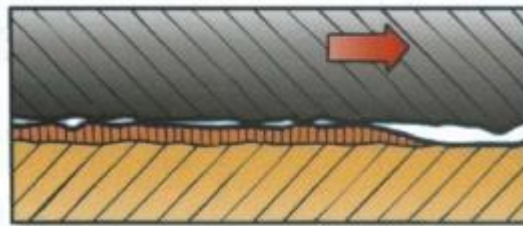


Figura 2.9-Mecanismo de desgaste. Adhesión.

- Abrasión. Ocasionado cuando partículas de la viruta endurecidas y localizadas, pasan sobre la cara de la herramienta. Estas partículas pueden ser fragmentos de la herramienta que son removidos por el desgaste por adhesión, fragmentos de un filo recrecido que se han endurecido o constituyentes duros del material de trabajo (Figura 2.10).



Figura 2.10-Mecanismo de desgaste. Abrasión.

- Difusión. Ocurre cuando los átomos de una red cristalina metálica con concentración atómica alta, se desplazan a una de concentración más baja. Este proceso está influenciado por la temperatura y se produce en el límite herramienta-viruta (Figura 2.11).

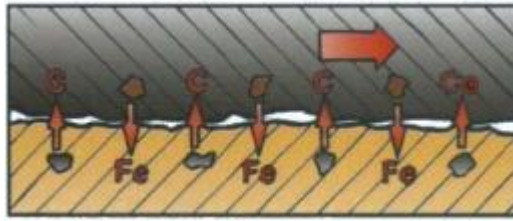


Figura 2.11-Mecanismo de desgaste. Difusión.

- Reacciones químicas. Las altas temperaturas y superficies limpias en la interfaz herramienta-viruta en el mecanizado a altas velocidades de corte pueden dar lugar a reacciones químicas en la superficie de inclinación de la herramienta (Figura 2.12).



Figura 2.12.-Mecanismo de desgaste. Reacciones químicas.

A medida que el corte se realiza, los distintos mecanismos de desgaste producen mayores niveles de desgaste en la herramienta. Por lo general puede diferenciarse tres regiones en la curva típica de crecimiento del desgaste, como se muestra en la siguiente figura (2.13).

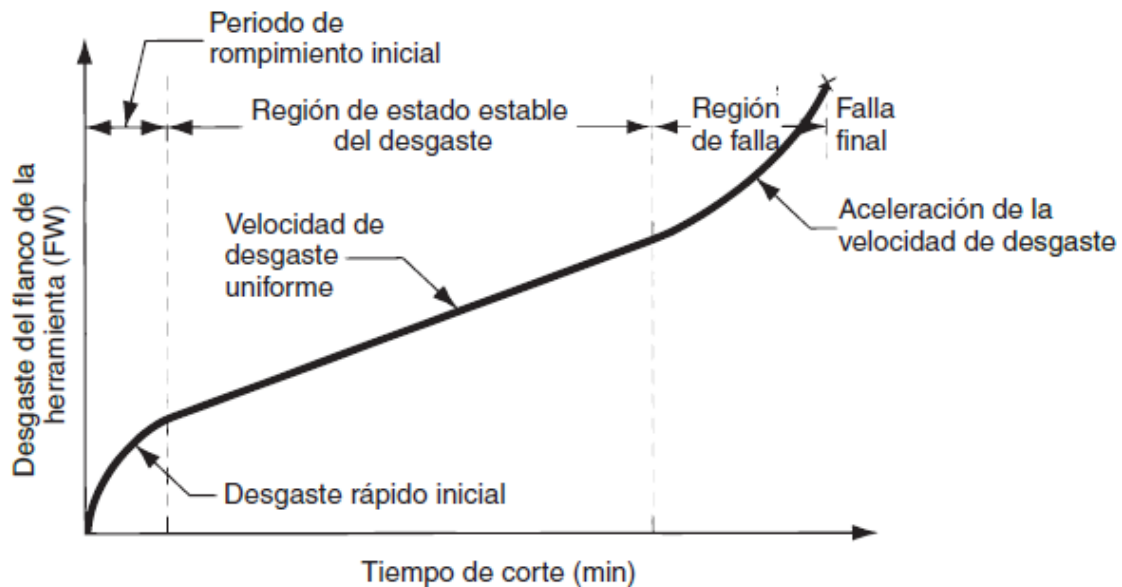


Figura 2.13.-Desgaste de la herramienta en función del tiempo de corte (Groover, 2007)

La primera región llamada como periodo como rompimiento inicial y representa un desgaste rápido de filo de dimensiones finitas que se produce por la adaptación de la herramienta al corte. La segunda región conocida como región de estado estable del desgaste y caracterizada por un desgaste uniforme de la herramienta. La última región, llamada región de falla, el desgaste progresa rápidamente siendo sensible la herramienta a la elevación de temperatura, llegando a la fractura de la herramienta sino se controla el incremento de esa temperatura.

Las condiciones de corte también influyen en el desgaste de la herramienta. La condición de corte de más importancia es la velocidad de corte, pues a mayor velocidad de corte, mayor es el desgaste de la herramienta y menos tiempo de vida tendrá.

La gran cantidad de calor generado en el mecanizado junto con las elevadas temperaturas hace necesario el uso de fluidos de corte, cuyas funciones son:

- Refrigeración. Objetivo enfriar eficazmente la herramienta.
- Lubricación. Reducción coeficiente de rozamiento.
- Separación de la viruta.
- Protección contra la corrosión.
- Lubricación de los órganos de la máquina herramienta.

Se pueden distinguir dos tipos:

- Aceites de corte.
- A base de agua (taladrina).

En general, su influencia sobre las fuerzas de corte radica en el tipo y material de herramienta, material a mecanizar, condiciones de corte y el tipo de mecanizado.

2.3.3. Vida de las herramientas.

Hay tres formas de rotura de una herramienta:

- Rotura por fractura. Se produce cuando se genera una fuerza de corte excesiva en la punta de la herramienta.
- Rotura por temperatura. Ocurre cuando la temperatura de corte es demasiada alta para el material de la herramienta, provocando el reblandecimiento del filo y la fractura de este. Suele aparecer cuando la velocidad de corte es demasiada elevada.
- Desgaste gradual. Desgaste progresivo del filo, provocando la disminución de la eficiencia del corte hasta la rotura.

La rotura por fractura y temperatura reducen la utilización de la herramienta y por tanto la pérdida prematura, por lo que es deseable que el desgaste sea gradual, sobre todo en el ámbito económico.

La rotura por fractura del filo suele causar daños en la superficie mecanizada. Este daño requiere que se vuelva a mecanizar la superficie o desechar la pieza porque la precisión dimensional no sea la correcta. Por lo que es muy importante seleccionar las condiciones de corte correctamente para evitar dañar la herramienta y por tanto la superficie mecanizada.

2.3.4. *Materiales para herramientas.*

El material de la herramienta que constituye la parte activa de la misma, debido a los esfuerzos que se producen en el corte, y a las altas temperaturas alcanzadas, deben tener las siguientes características:

- Resistencia mecánica. Necesaria para que la sección de la herramienta resista el esfuerzo al que va a ser sometida y para conseguir buena calidad dimensional en el mecanizado, que dependerá de la deformación de la herramienta.
- Tenacidad. Da resistencia al choque y a las presiones de corte. Es antagónica a la dureza, al aumentar uno disminuye la otra y viceversa.
- Resistencia al desgaste. De ella depende la vida de la herramienta y la calidad superficial.
- Conductividad térmica. Debe ser tal que evacue el calor generado en el corte.

Los materiales más empleados en las herramientas son:

- Acero al carbono. Aceros fundidos con contenidos en carbono, templados y revenidos para adquirir mayor dureza y resistencia al desgaste. Actualmente no se usan debido al perfeccionamiento de las máquinas herramientas y a causa del aumento de las velocidades de trabajo, ya que no se pueden usar a temperaturas mayores de 250 °C.
- Aceros aleados. Además del carbono contienen otros metales, que aumentan considerablemente la resistencia al desgaste. Van templados y revenidos para mejorar la dureza y tenacidad, aunque no resisten temperaturas mayores de 280 °C, por lo que su uso se restringe a operaciones de acabado. Se conocen como semirrápidos.
- Aceros rápidos. Son aceros al carbono a los que se le añade wolframio, que mejora la resistencia al desgaste. Soportan temperaturas hasta 600 °C sin perder la capacidad cortante. Fueron descubiertos por Taylor y su utilización posibilitó aumentar la cantidad de viruta arrancada por unidad de tiempo.

- Aleaciones no ferrosas. Se conocen como estelitas. Son aleaciones de cromo, cobalto, wolframio y otros metales. Permiten trabajar a velocidades superiores a la de los aceros rápidos y soportan temperaturas de hasta 700 °C, aunque son más frágiles. Han sido sustituidos por los metales duros.
- Son carburos que se fabrican por sinterización. Poseen dureza y resistencia al calor, lo que permite trabajar a altas velocidades, conservando el filo a temperaturas superiores a los 800 °C. Suelen ser frágiles.
- Cerámicas de corte. Están fabricadas principalmente por óxido de aluminio y suelen llevar otros óxidos para mejorar su resistencia a altas temperaturas. Permiten trabajar a grandes velocidades y resisten temperaturas de 1200 °C sin perder el filo. Son enormemente frágiles. Entre sus ventajas están: nulo desgaste de la superficie de desprendimiento, facilidad para que no se adhiera viruta y brillante aspecto de la superficie mecanizada.
- Diamante. El material más duro que se conoce, aunque su empleo está reducido por la aparición de metales duros y las cerámicas de corte, además de su elevado precio. Se utiliza principalmente para trabajos de acabado.

2.3.5. Modelos de corte.

La geometría de la mayoría de los procesos de mecanizado es algo compleja, donde la herramienta penetra en la pieza generalmente con el filo de corte inclinado (corte oblicuo) pero es usual utilizar en los trabajos teóricos y experimentales un modelo simplificado conocido como “corte ortogonal” donde el filo de corte de la herramienta es perpendicular a la dirección de corte. Este modelo (Figura 2.14)

desprecia muchas complejidades por lo que resulta más sencillo relacionar resultados experimentales con expresiones analíticas y resultados numéricos.

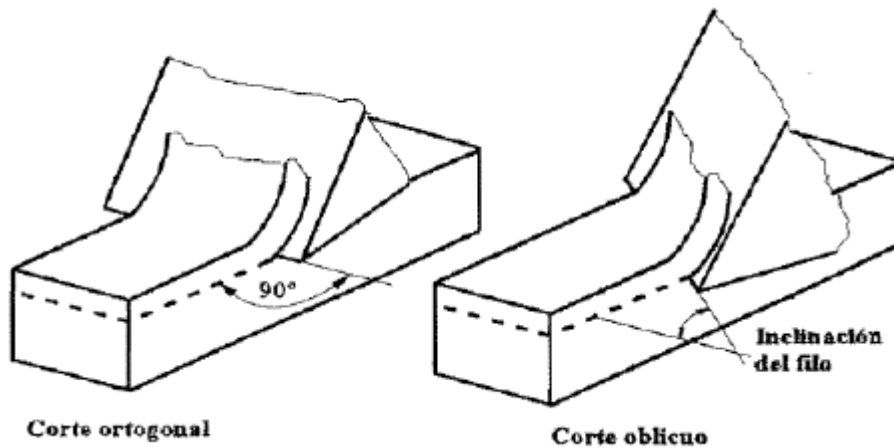


Figura 2.14.-Modelos de corte (Ing. Mecanizado, 2014)

Existen diferentes modelos y teorías que caracterizan el corte ortogonal, centrandonos en el presente trabajo en el modelo del plano de cizallamiento .

2.4. Problema a estudiar. Modelo del plano de cizallamiento.

Pijspanen propuso que la viruta se forma por elementos infinitesimales que deslizan unos sobre otros por la acción de la herramienta, sufriendo una inclinación debido a la superficie de desprendimiento, según un plano por el que pasan todos los elementos (Figura 2.15). Este plano forma un ángulo ϕ con la superficie mecanizada llamado ángulo de cizallamiento.

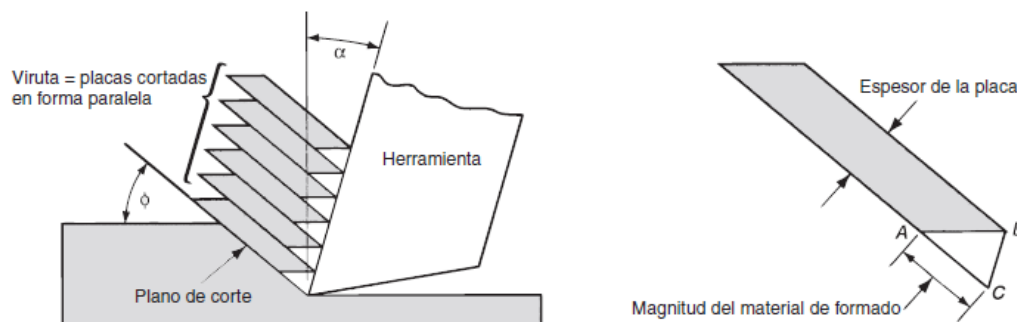


Figura 2.15.-Esquema de la formación de viruta (Groover, 2007)

En este modelo se supone también que:

- La herramienta está perfectamente afilada (no tiene desgaste).
- El cizallamiento se produce en un plano.
- El material mecanizado es rígido-plástico, no adquiere acritud.
- El flujo de la viruta es continuo.
- Los esfuerzos en el plano de cortadura son uniformes.

Al presionar la herramienta contra el material se forma la viruta por deformación cortante a lo largo de un plano llamado plano de corte; este forma un ángulo α , llamado ángulo de ataque con la superficie de trabajo y determina la dirección en la que fluye la viruta. El material se deforma plásticamente a lo largo del plano de corte, donde la mayoría de la energía mecánica se consume en el proceso.

En la región de cizalladura hay tres zonas bien diferenciadas como se observa en la Figura 2.16 (Groover, 2007):

- Zona primaria. Cizallamiento severo que fuerza al material a deslizarse por la cara de desprendimiento. Gran disipación de calor.
- Zona secundaria. Sobre la cara de desprendimiento, donde se genera un gran rozamiento.
- Zona terciaria. El material se lamina, generando virutas.

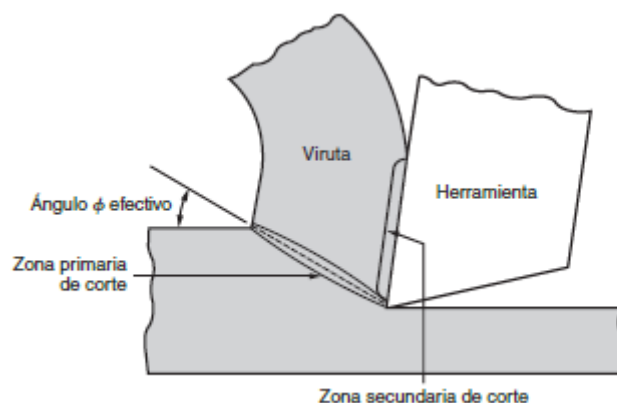


Figura 2.16.-Zonas de cizalladura (Groover, 2007).

Durante el proceso de corte, el filo de la herramienta se coloca a cierta distancia de la superficie original de trabajo. Esta distancia corresponde con el espesor de viruta

inicial (t_0). Al iniciar el proceso de corte, la viruta se forma a lo largo del plano de corte, incrementando el espesor a t_c . La relación entre el espesor inicial y final de viruta se llama relación de viruta r :

$$r = \frac{t_0}{t_c} \quad (7)$$

Esta relación será siempre menor a 1, debido a que el espesor de viruta después del corte es mayor que el espesor inicial.

Además de t_0 , el corte ortogonal tiene otra dimensión, que corresponde con la anchura w (como se observa en la Figura 2.17) pero no es muy relevante en el análisis del corte ortogonal, pues es un modelo bidimensional en el que una dimensión se corresponde con el avance y la otra dimensión con la dirección de corte, por lo que estos dos factores tienen mayor influencia en el análisis.

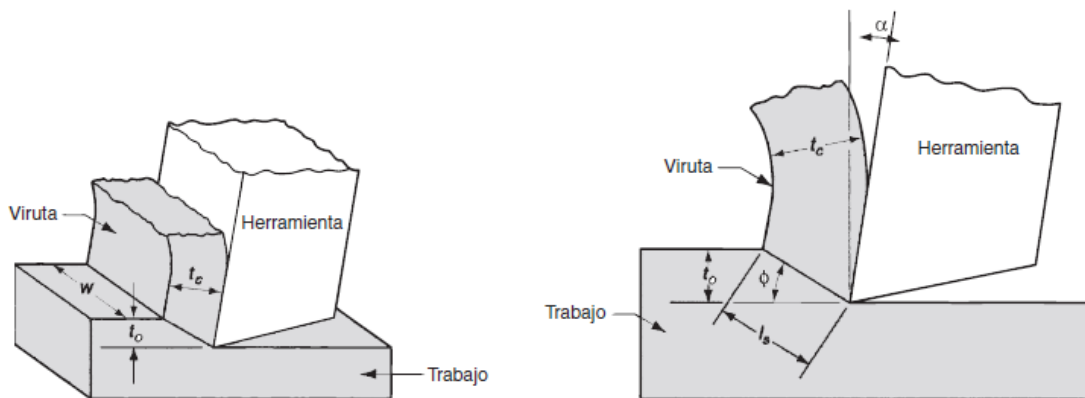


Figura 2.17.-Corte ortogonal (Groover, 2007)

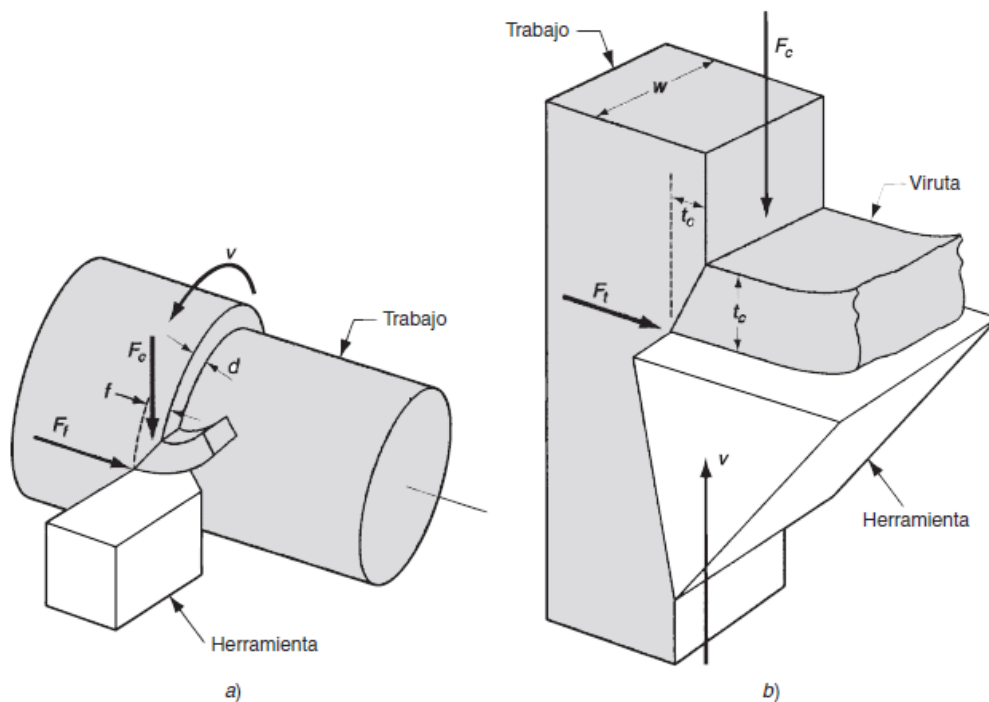
La forma del modelo ortogonal permite establecer una relación importante entre el espesor de viruta, el ángulo de cizallamiento y el ángulo de ataque. Sea l_s la longitud del plano de corte, $t_0 = l_s \sin \phi$ y $t_c = l_s \cos(\phi - \alpha)$. Entonces sustituyendo:

$$r = \frac{t_0}{t_c} = \frac{l_s \sin \phi}{l_s \cos(\phi - \alpha)} = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (8)$$

Agrupando la expresión anterior, con el fin de obtener φ :

$$\tan \varphi = \frac{r \cos \alpha}{1 - r \sin \alpha} \quad (9)$$

El modelo ortogonal se puede usar para aproximar el torneado, objeto del presente proyecto, y otras operaciones de mecanizado, mientras el avance en estas operaciones sea menor que la profundidad de corte. La siguiente figura (Figura 2.18) muestra la conversión de una situación de corte a la otra (Groover, 2007).



Aproximación del torneado por el modelo ortogonal: a) torneado y b) el corte ortogonal correspondiente.

Figura 2.18.-Aproximación del torneado al corte ortogonal (Groover, 2007)

La interpretación de las condiciones de corte es diferente en los dos casos. En el corte ortogonal, el espesor de la viruta antes del corte t_0 corresponde con el avance f en el torneado y el ancho de corte w corresponde a la profundidad de corte d en el torneado. La velocidad de corte y fuerza de corte tiene la misma interpretación en ambos casos. La siguiente tabla muestra un resumen de las conversiones que propone Groover (2007).

Tabla 2.1.-Clave de conversión en el corte ortogonal (Groover, 2007)

Operación de torneado	Modelo de corte ortogonal
Avance $f =$	Espesor de la viruta antes del corte t_0
Profundidad $d =$	Ancho del corte w
Velocidad de corte $v =$	Velocidad de corte v
Fuerza de corte $F_c =$	Fuerza de corte F_c
Fuerza de avance $F_f =$	Fuerza de empuje F_t

2.4.1. Formación de la viruta.

La formación de viruta depende del tipo de material y las condiciones de corte en el proceso (Groover, 2007). Se pueden distinguir tres tipos de viruta y su forma se puede ver en la Figura 2.19:

- Viruta discontinua. Cuando se mecanizan materiales relativamente frágiles, como por ejemplo hierro fundido, a baja velocidad de corte, la viruta se forma frecuentemente en segmentos separados. Esto tiende a una superficie a un acabado irregular de la superficie mecanizada.
- Viruta continua. Cuando se mecanizan materiales de trabajo dúctiles a velocidades altas con avances y profundidades pequeños, se forman virutas largas y continuas. Se obtiene un buen acabado superficial. Una baja fricción herramienta-pieza propician la formación de este tipo de viruta. Puede provocar problemas como enredamiento en la herramienta. Para solucionar este problema, las herramientas están equipadas con separadores de viruta o rompevirutas.

- Viruta continua con acumulación en el borde. Aparecen cuando se mecanizan materiales dúctiles a velocidades bajas o medias de corte, la fricción herramienta-pieza tiende a causar la adhesión de pequeñas partículas de material en la cara inclinada de la herramienta. Esta formación se llama acumulación en el borde (BUE). La naturaleza de la formación de viruta es cíclica; se forma y crece, se vuelve inestable y se rompe. La herramienta sufre un desgaste considerable y la superficie acabada puede ser rugosa debido a que algunas porciones de viruta pueden incorporarse a la superficie de trabajo.
- Viruta dentada. Estas virutas son semicontinuas y tienen forma de diente de sierra. Suelen aparecer en metales difíciles de mecanizar, como por ejemplo, aleaciones de aluminio, aunque es común verla en el mecanizado de acero cuando la velocidad de corte es muy elevada.

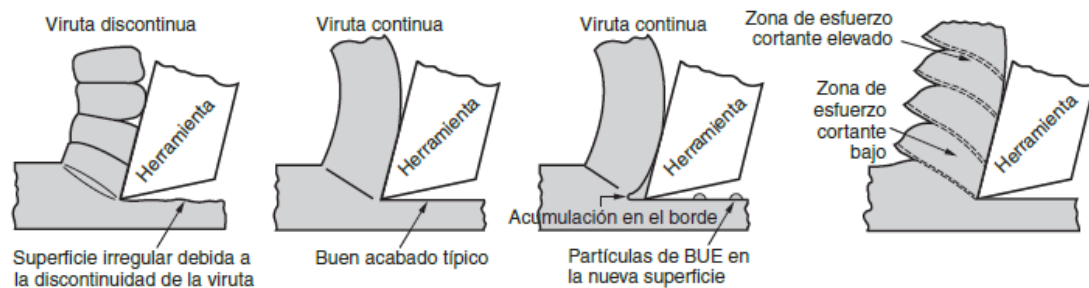


Figura 2.19.-Tipos de formación de virutas en el corte (Groover, 2007)

3. ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE CORTE

3.1. Modelos analíticos. Modelos de corte ortogonal.

3.1.1. Relaciones de fuerza y ecuación de Merchant.

Groover (2007) define varias fuerzas en el modelo ortogonal. A partir de estas fuerzas podemos definir esfuerzo cortante, el coeficiente de fricción y otras relaciones. En la Figura 3.1 se puede ver las distintas fuerzas que actúan en el proceso de corte:

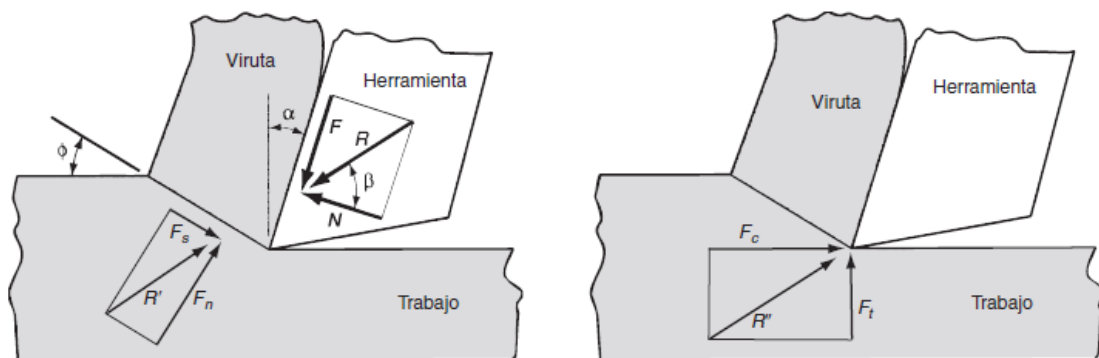


Figura 3.1.-Fuerzas sobre la viruta y herramienta en el corte ortogonal (Groover, 2007)

Las fuerzas que actúan en el proceso de corte se pueden observar en la Figura 3.2. Las fuerzas que la herramienta ejerce sobre el tocho de material se pueden separar en dos componentes perpendiculares. La fuerza de fricción F es la que resiste el flujo de viruta durante el proceso a lo largo de la cara inclinada de la herramienta. La fuerza normal a la fuerza de fricción N es perpendicular a F . Se pueden utilizar para definir el coeficiente de fricción entre la herramienta y la viruta:

$$\mu = \frac{F}{N} \quad (10)$$

También aparecen otro par de fuerzas que aparecen durante el corte, en la dirección del plano de cizalladura. Estas son la fuerza de cizalladura F_s , que provoca la deformación en el corte; y la fuerza normal a la cizalladura F_{ns} . Estas fuerzas permiten determinar la tensión dinámica de cizalladura y la tensión normal en el plano de cizalladura.

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad \sigma = \frac{F_n}{A_s} \quad (11)$$

siendo A_s el área del plano de cizalladura.

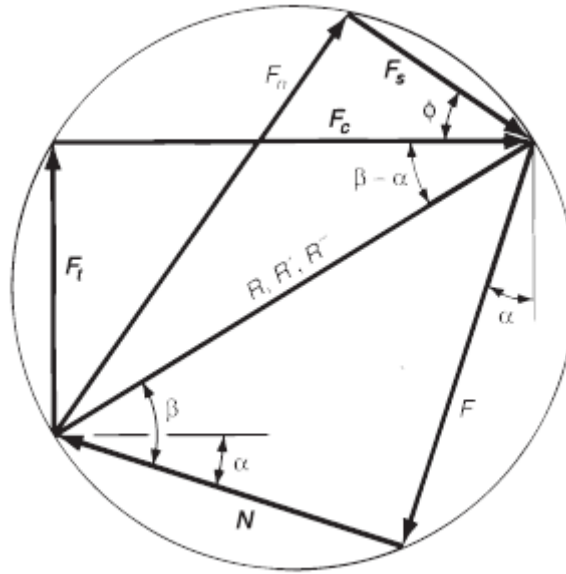


Figura 3.2.-Diagrama de fuerzas en el corte ortogonal (Groover, 2007)

Si observamos la figura anterior (Figura 3.2), la suma vectorial de la fuerza de cizalladura y fuerza normal de cizalladura da como resultado la fuerza resultante R' . Para que haya equilibrio de fuerzas, R' debe ser igual en magnitud, pero en dirección opuesta a R .

Las fuerzas F , N , F_s y F_n no pueden medirse directamente durante el proceso de mecanizado porque la dirección de las fuerzas que actúan varían en función de la posición de la herramienta y las condiciones de corte. Para ello, se utiliza un dispositivo que mide dos fuerzas adicionales, como son la fuerza de corte F_c en la dirección de corte y la fuerza de empuje F_t perpendicular a la fuerza de corte.

Utilizando la figura anterior (Figura 3.2), se pueden deducir relaciones entre las cuatro fuerzas que no podíamos conocer directamente y las fuerzas que se pueden obtener a partir de la medida del dinamómetro:

$$F = F_c \sin \alpha + F_t \cos \alpha \quad (12)$$

$$N = F_c \cos \alpha - F_t \sin \alpha \quad (13)$$

$$F_s = F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi \quad (14)$$

$$F_n = F_c \sin \varphi + F_t \cos \varphi \quad (15)$$

Se puede observar en el caso especial de que el ángulo de ataque sea 0, las dos primeras ecuaciones del bloque expresado anteriormente se reducen a:

$$F = F_t \quad (16)$$

$$N = F_c \quad (17)$$

Entonces, en este caso, la fuerza de fricción y la fuerza normal pueden ser directamente medidas por el dinamómetro.

También podemos deducir de la figura anterior que:

$$\tan \beta = \mu = \frac{F}{N} \quad (18)$$

De la Figura 3.2 podemos sacar las siguientes relaciones:

$$\cos(\beta - \alpha) = \frac{F_c}{R} \quad (19)$$

$$\cos(\beta - \alpha + \varphi) = \frac{F_s}{R} \quad (20)$$

Despejando R de una de las ecuaciones y sustituyendo en la otra, obtenemos:

$$F_c = \frac{F_s \cos(\beta - \alpha)}{\cos(\beta - \alpha + \varphi)} \quad (21)$$

Suponiendo una distribución uniforme de tensiones sobre el plano de cizalladura, tenemos:

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \quad (22)$$

$$\sin \varphi = \frac{A}{A_s} \rightarrow A_s = \frac{A}{\sin \varphi} \quad (23)$$

siendo A la sección de la viruta sin deformar. Sustituyendo (23) en (22) y despejando:

$$F_s = \tau A_s = \frac{\tau A}{\sin \varphi} \quad (24)$$

Despejando la fuerza de corte,

$$F_c = \frac{\tau A \cos(\beta - \alpha)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha)} \quad (25)$$

Para obtener el ángulo de cizalladura (aún desconocido) Merchant asumió el principio de mínima energía en el proceso de deformación, debido a que la derivada de la fuerza de corte con respecto a φ es nula.

$$\frac{dF_c}{d\varphi} = 0 \rightarrow \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{\tau A \cos(\beta - \alpha)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha)} \right) = 0 \quad (26)$$

Dando lugar a la ecuación de Merchant

$$\varphi = \frac{C}{2} + \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (27)$$

Donde C es una constante del material.

3.1.1.1. Consideraciones de la ecuación de Merchant.

- La viruta es un cuerpo rígido en equilibrio por la acción de las fuerzas que se transmiten a través de la zona de contacto viruta-herramienta y plano de cizalladura.
- Toda la fuerza se transmite a través de la zona de contacto.

3.1.2. Segunda Ley de Merchant.

Merchant desarrolló una segunda teoría. Así, supuso que la tensión dinámica de cizalladura aumenta de forma lineal con la tensión normal al plano de cizallamiento, con el objetivo de minimizar la fuerza de corte. Así se tiene:

$$\tau_s = \tau_0 + k \sigma_s$$

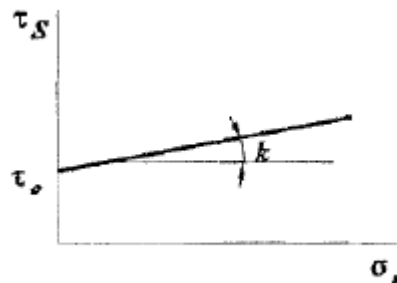


Figura 3.3.-Segunda Ley de Merchant (Ing. Mecanizado, 2014)

donde τ_0 y k son constantes del material. Procediendo como anteriormente se obtiene las expresiones de F_c y φ :

$$2\varphi + \beta - \alpha = \cot^{-1} \frac{1}{k} = C \quad (28)$$

$$F_c = \tau_s A [\cot \varphi \tan(C - \varphi) - 1] \quad (29)$$

En la tabla 3.1 se expresan los valores de C para distintos materiales:

Tabla 3.1.-Constante C para distintos materiales (Groover, 2007)

Material	C
Acero	70-80°
Acero inoxidable	80-90°
Aluminio	50°

Hay diferencias del 45 % en el valor del ángulo de cizallamiento obtenido mediante análisis analítico respecto al ángulo obtenido numéricamente, aunque en ambos hay linealidad entre φ y $(\beta - \alpha)$.

En la Figura 3.4. se observa la linealidad entre ambos. En general, un aumento de φ provoca una disminución de la sección de la viruta en el plano de cizalladura.

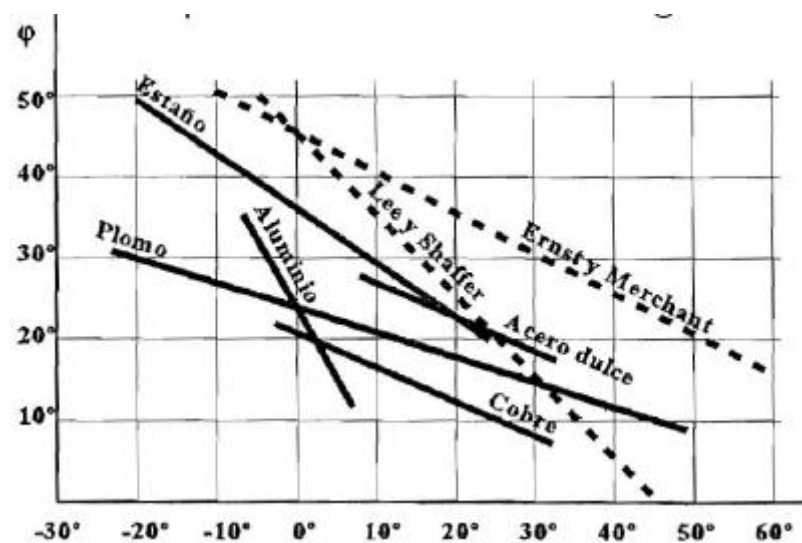


Figura 3.4.-Representación del ángulo de cizalladura (Ing. Mecanizado, 2014).

Entre las causas de las diferencias del ángulo de cizallamiento se encuentran: Se supone analíticamente una herramienta rígida y aguda. En la práctica el filo está siempre redondeado. Dicha filo recalca el material apareciendo una fuerza de rozamiento entre la superficie de incidencia o flanco y la pieza, que se opone a la formación de la viruta.

El concepto de plano de cizalladura no es real, más bien zona de cizalladura OAB, como se muestra en la Figura 3.5 (Groover, 2007):

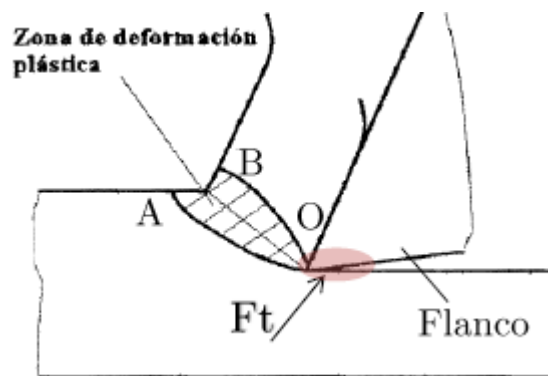


Figura 3.5.-Zona de cizalladura en el corte real (Groover, 2007)

3.1.3. Potencia y energía de corte en el mecanizado.

El producto de la fuerza de corte y la velocidad se conoce como potencia, que es la energía que requiere el proceso por unidad de tiempo:

$$P_c = F_c v_c \quad (30)$$

La potencia requerida en la máquina herramienta es mayor que la necesaria en el proceso de corte, es decir, hay unas pérdidas mecánicas en el motor y en la transmisión del movimiento. Estas pérdidas se pueden calcular como:

$$P_g = \frac{P_c}{E} \quad (31)$$

siendo E la eficiencia de la máquina herramienta. El valor típico es aproximadamente del 90% (Groover, 2007).

Muchas veces es más útil usar la potencia por unidad de volumen de corte de material en vez de potencia por unidad de tiempo. A la potencia por unidad de volumen se le llama potencia unitaria U :

$$U = \frac{P_c}{R_{MR}} \quad (32)$$

donde R_{MR} es la tasa de remoción del material. La tasa de remoción de material se puede calcular como:

$$R_{MR} = v_c t_0 w \quad (33)$$

La potencia unitaria también se conoce como energía específica U .

$$U = \frac{P_c}{R_{MR}} \quad (34)$$

La siguiente tabla (Tabla 3.2) muestra los valores típicos de energía específica de corte de diferentes materiales:

Tabla 3.2.-Valores de energía específica para distintos materiales (Groover, 2007)

Material	Dureza Brinell	Energía específica U o potencia unitaria P_u		Caballos de fuerza unitaria en HP_u hp/(in ³ /min)
		N-m/mm ³	in-lb/in ³	
Acero al carbono	150-200	1.6	240 000	0.6
	201-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
Aceros aleados	200-250	2.2	320 000	0.8
	251-300	2.8	400 000	1.0
	301-350	3.6	520 000	1.3
	351-400	4.4	640 000	1.6
Hierros fundidos	125-175	1.1	160 000	0.4
	175-250	1.6	240 000	0.6
Acero inoxidable	150-250	2.8	400 000	1.0
Aluminio	50-100	0.7	100 000	0.25
Aleaciones de aluminio	100-150	0.8	120 000	0.3
Latón	100-150	2.2	320 000	0.8
Bronce	100-150	2.2	320 000	0.8
Aleaciones de magnesio	50-100	0.4	60 000	0.15

Los valores de la tabla anterior suponen dos consideraciones:

1. Herramienta de corte afilada.
2. El valor de la viruta antes del corte es 0.25 mm.

El espesor de la viruta inicial afecta también a la energía específica de corte, pues a menor espesor de viruta, mayor potencia de corte se requiere, conocida esta relación como efecto de tamaño.

Si queremos calcular la energía específica para un espesor de viruta inicial diferente a 0.25 mm, se usa un factor de corrección, que se muestra en la siguiente figura (Figura 3.6).

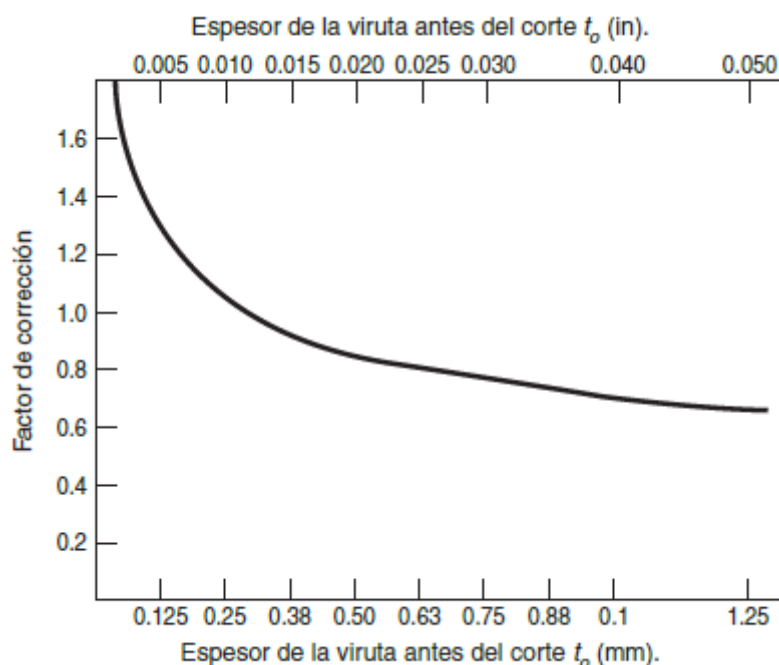


Figura 3.6.-Factor de corrección para la energía específica (Groover, 2007)

3.2. FEM (Finite Element Methods). Método de elementos finitos.

El análisis de un proceso mecánico puede llevarse a cabo a través de tres tipos de estudio: teórico o analítico, experimental y numérico. El análisis teórico se lleva a cabo a través de un modelo simplificado, que consiste en una serie de ecuaciones simplificadas para calcular diferentes magnitudes que actúan sobre el sólido que estamos analizando. En el caso del torneado, obtenemos fuerzas y distintas magnitudes (descritas en el apartado anterior). El análisis experimental o empírico

consiste en hacer diferentes ensayos al material de análisis y medir el comportamiento real de ese material. Cada día se está restringiendo más este tipo de análisis debido a los costes que algunos procesos requieren, por lo que antes de hacer pruebas experimentales se hace un análisis teórico o un análisis numérico. Los análisis numéricos consisten en analizar el proceso por medio de programas en computadoras que permiten simular las distintas condiciones a las que está sometida el material de trabajo.

3.2.1. Tipos de métodos numéricos empleados en análisis mecánico.

- Métodos de elementos finitos. Aproximación variacional fuerza-desplazamiento. Es el más empleado en análisis mecánicos.
- Diferencias finitas. Discretización de ecuaciones diferenciales.
- Volúmenes finitos. Discretización ecuaciones de conservación.
- Métodos espectrales. Simplificar el problema en otro más sencillo de resolver.
- Métodos mesh-free. Combina el método de elementos finitos y diferencias finitas.

3.2.2. Método de elementos finitos.

Uno de los usos de los elementos finitos es simular sistemas físicos. Esto requiere modelos de tales sistemas. El proceso se puede ver en la Figura 3.7. La parte central es el sistema físico que va a ser modelado. La idealización y discretización son llevados a cabo a la vez para producir el modelo discreto. La solución es procesada por una ecuación implementada en el programa FEM que entrega una solución discreta (o soluciones).

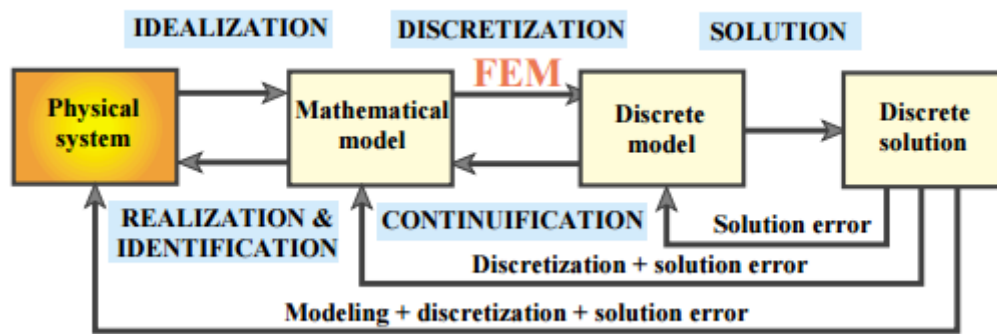


Figura 3.7.-Diagrama de evolución de elementos finitos (ASEN 5007, 2016)

Una forma de ajustar el modelo discreto que mejor representa el sistema físico es el llamado model updating, que se representa en la siguiente figura (Figura 3.8)

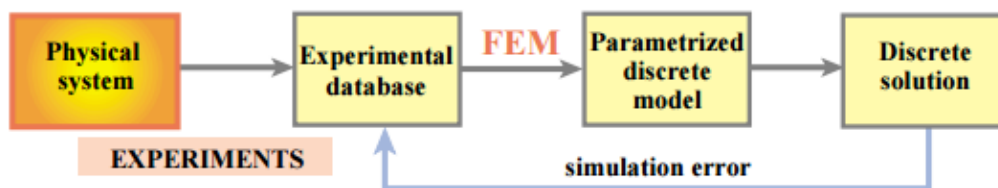


Figura 3.8.-Ajuste del método numérico para el torneado (ASEN 5007, 2016)

Una vez tenemos el sistema físico a analizar se realizan ensayos experimentales. Con los datos obtenidos se crea un modelo discreto, se discretiza y se obtiene una solución. Si no se aproxima a la solución que vamos buscando, se vuelve a los datos experimentales, se corrige el error y se realiza la misma secuencia hasta obtener una solución que converja.

3.2.2.1. Pasos para el análisis por elementos finitos en programas comerciales.

- Pre-procesado.
 - Definir una geometría representativa del sistema físico a analizar.
 - Material (elasticidad, plasticidad, modelos de daño, etcétera), Condiciones de contorno (restricciones, cargas externas).
 - Discretización del modelo. Mallado.

- **Procesado.** En esta etapa el programa calcula las matrices de rigidez y se produce el ensamblado de la matriz global del sistema. Es la etapa de mayor intensidad de cálculo y el tiempo y por tanto el coste computacional dependerá del tamaño del modelo, así como el número de elementos, nodos y grados de libertad.
- **Post-procesado.** Visualización e interpretación de resultados.

3.2.2.2. Programas para la aplicación del FEM.

La siguiente tabla (Tabla 3.3) muestra una lista de los software más destacados de elementos finitos y el tipo de acceso al cliente.

Tabla 3.3.-Lista de software comerciales de elementos finitos.

Software	Acceso
Abaqus	Comercial
Ansys	Comercial
Catia v5	Comercial
Deform-2D/3D	Comercial
Elmer	Libre
Impact	Libre
Open FEM/FOAM	Libre

El programa que hemos utilizado en la realización del presente trabajo ha sido Abaqus CAE. Con Abaqus CAE se puede rápida y eficazmente crear, editar, monitorizar, diagnosticar y visualizar análisis avanzados. Dispone de una interfaz intuitiva que integra el modelado, análisis, gestión de trabajos y resultados de la visualización en un entorno muy productivo.

Los usuarios pueden crear geometrías, modelos de importación CAD para mallado, o integrar mallas basadas en la geometría que no tienen asociación geométrica CAD. Incluye interfaces asociativas para CATIA V5, SolidWorks y Pro/ENGINEER permitiendo la asociación CAD/CAE y permitiendo al usuario hacer cambios en el modelo sin pérdidas de funciones de análisis.

El módulo de visualización integrada permite a los usuarios interpretar y comunicar los resultados de cualquier análisis de Abaqus.

3.2.2.3. Definición de elemento finito.

Un elemento finito es una división en los que se discretiza el modelo geométrico.

Se caracteriza por:

- Dimensiones
 - Masas puntuales.
 - Barras y vigas.
 - Placas.
 - Sólidos.
- Nodos. Definen los grados de libertad.
- Tamaño. Más pequeño en regiones donde se quiera analizar cargas.

3.2.2.4. Formulación en la discretización.

- Euleriana. Malla fija en el espacio. Tiene la ventaja de que necesita menor número de elementos y por tanto el coste de computación será menor.
- Lagrangiana. La malla se deforma con el material. Es necesario un gran número de elementos para obtener buenos resultados locales. Por tanto el tiempo de computación es mayor.
- ALE. Formulación acoplada. El movimiento de la malla es limitado por el movimiento del material solo donde sea necesario, por lo que el movimiento de la malla y del material son independientes.

A mayor número de elementos, mayor precisión en los cálculos pero tiene el inconveniente de que el coste computacional es mayor.

4. MÉTODO EMPÍRICO O EXPERIMENTAL Y MATERIALES

4.1. Material de la pieza de trabajo.

El material empleado en el presente trabajo para los distintos ensayos en el laboratorio es el Aluminio 6063 (AA 6063), denominada de acuerdo a Aluminium Association (AA). Es una aleación de aluminio enriquecido que contiene principalmente aluminio, magnesio y silicio. Es una aleación dúctil y ligera, con gran resistencia y excelentes características de acabado. Es ideal para la elaboración de piezas mecanizadas que requieren buen acabado superficial. Posee alta resistencia a la corrosión, además de facilidad para ser soldado.

ASM (Aerospace Specification Metal) propone como composición química los valores que se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1.-Composición química del AA6063

	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Otros
%	97.15	0.04	0.15	0.7	0.8	0.15	0.4	0.15	0.25	0.21

Material Property Data (Matweb) propone como propiedades físicas de material los valores de la Tabla 4.2:

Tabla 4.2.-Propiedades físicas del AA6063

Densidad [g/cm^3]	2.70
Dureza Brinell	95
Dureza Rockwell A	40
Dureza Rockwell B	60
Dureza Vickers	107
Tensión última [MPa]	310
Tensión de fluencia [MPa]	276
Elongación de rotura (a 100 °C) [%]	18
Módulo de elasticidad [MPa]	68900
Coeficiente de Poisson	0.33
Rango de fusión [°C]	582-651.7
Resistencia a la cizalladura [MPa]	186



Figura 4.1.-Material de trabajo. AA6063

4.2. Material de la herramienta.

La elección del material de la herramienta y su geometría, se llevó a cabo teniendo en cuenta el material de la pieza de trabajo, pues para el aluminio se necesita una herramienta con un ángulo de desprendimiento grande para facilitar la eliminación de viruta y disminuir los esfuerzos en el corte, así como el calor desarrollado. También hay que tener en cuenta que un ángulo demasiado grande puede llevar a la rotura del filo.

Entre las distintas herramientas disponibles, seleccionamos con una aleación de acero rápido HSS (High Speed Steel) de la serie M, ya que permite trabajar con grandes ángulos de desprendimiento y evacuan bien el calor producido durante el corte.

Los aceros rápidos son aceros especiales de alto rendimiento con elevada dureza hasta los 500 °C y elevada resistencia al desgaste gracias a elementos de aleación como el tungsteno, molibdeno, vanadio y cromo capaces de formar carburos. Para aumentar su dureza a altas temperaturas se añade cobalto. (Erasteel, 2016).

El material empleado es una aleación sin cobalto y se emplea para fabricar herramientas de corte para procesos como el torneado, fresado; herramientas para trabajos en frío, etcétera.

En el presente proyecto, la herramienta utilizada se generó a partir de una barra rectangular, que se afiló en el taller del departamento de Ingeniería Mecánica de la

Universidad de Jaén, siendo los ángulos de desprendimiento 10° , el ángulo de incidencia 25° y el ángulo de filo 55° con radio de punta de 0.

La composición química y las propiedades físicas del HSS M2 según Erasteel se muestran en las Tablas 4.3 y 4.4 respectivamente:

Tabla 4.3.-Composición química en % del HSS M2.

	C	Cr	Mo	W	Co	V
%	0.90	4.2	5	6.4	-	1.8

Tabla 4.4.- Propiedades físicas del HSS M2.

	20 °C	400 °C	600 °C
Desnidad [g/cm³]	8.1	8.1	8
Módulo de elasticidad [kN/mm²]	225	200	180
Coeficiente de dilatación [°C]	-	$12.1 \cdot 10^{-6}$	$12.6 \cdot 10^{-6}$
Coeficiente de conductividad [W/m °C]	24	28	27
Calor específico [J/kg °C]	420	510	600

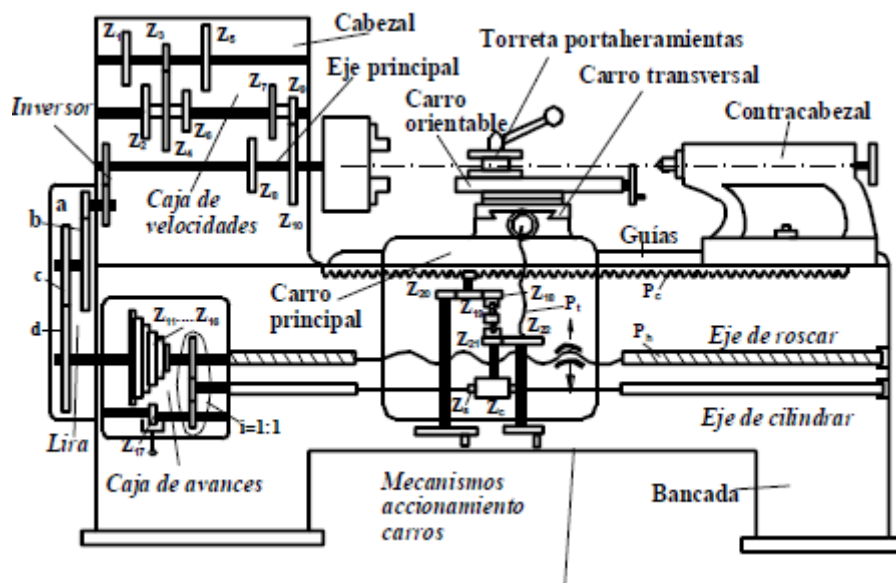
4.3. Máquina-herramienta.

La máquina herramienta utilizado en el presente trabajo para la realización de los ensayos experimentales ha sido un torno horizontal o paralelo Pinacho SP/165 (Figura 4.2)

UNE 15411 da la terminología de los órganos principales del torno paralelo. Se pueden considerar las siguientes partes:

- Bancada. Es el órgano más grande y robusto, sujeto por uno o más pies. Sirve de soporte a los demás órganos.
- Cabezal. Es una caja situada encima de la bancada, donde se encuentra el eje principal (donde se monta la pieza), y prevista de distintos mecanismos que transmiten el movimiento de rotación.
- Eje principal. Es una pieza de acero, hueco, para poder dar paso a determinadas barras para el mecanizado. La parte hueca acaba en un cono interior normalizado, para poder montar diversos accesorios. La

- | | | | | |
|----------------|----------------|----------------|---------|------------------------|
| Z ₀ | Z ₃ | Z ₅ | Cabezal | Torre de portabarridos |
|----------------|----------------|----------------|---------|------------------------|



4.3.1. Pasos para la configuración de la operación de torneado.

- Definir la velocidad de corte. Para seleccionar la velocidad de corte requerida, observamos la tabla que aparece en la caja de velocidades y movemos las distintas palancas según la velocidad requerida (Figura 4.3),



Figura 4.3.-Caja de velocidades del torno.

- Definir al avance. En la caja de avances del torno aparecen todos los avances que dispone el torno. Pues seleccionando en la tabla que aparece el avance que necesitamos para el ensayo, movemos las palancas a la posición correcta (Figura 4.4).



Figura 4.4.-Caja de avances del torno.

- Definir la profundidad. Se define moviendo el carro transversal (Figura 4.5)



Figura 4.5.-Carros principal, transversal y orientable del torno.

4.4. Medición de las fuerzas de corte. Dinamómetro.

En el presente trabajo se usa un dinamómetro multicomponente que proporciona medidas dinámicas y cuasi-estáticas de las tres componentes ortogonales de la fuerza: F_x , F_y y F_z .

Su alta resolución permite la medida de cambios dinámicos muy pequeños dentro de los valores de fuerza muy elevados. El dinamómetro mide la fuerza de corte activa independientemente de su punto de aplicación.

La fuerza a medir es introducida a través del plato superior y distribuido entre 4 sensores de fuerza situados entre los platos superior e inferior. Cada sensor dispone de 3 pares de discos de cuarzo, cada uno sensible a la presión de cada eje. En estos 4 sensores, la fuerza introducida se descompone en tres fuerzas.

Para acceder a los datos que toma el dinamómetro, necesitamos un programa informático. Para ellos utilizamos el DaqView, que permite adquirir los datos y guardarlos en diferentes formatos para poder ser analizados posteriormente. Los formatos incluyen el ASCII, para poder analizar datos desde Excel.

También se conectó un amplificador de carga tipo 5070A (Figura 4.6) cuya función principal es recibir la señal de carga de un sensor piezoeléctrico y convertirla

en una tensión proporcional. El amplificador permite modificar la sensibilidad o el rango de medida entre otros parámetros.



Figura 4.6.-Amplificador de carga Kistler 5070A.

5. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MEDIANTE FEM

En este apartado se van a describir los pasos que se han llevado a cabo para definir el modelo en el software que hemos utilizado en el presente trabajo. El software utilizado ha sido Abaqus 6.13-1.

Cuando se genera un modelo, en la carpeta específica del programa *Temp* se generan una serie de archivos con diferentes extensiones. Entre los más destacadas se encuentran un archivo con extensión *.dat* donde se encuentra el código de todos los parámetros que hemos introducido en el interfaz del programa como por ejemplo condiciones de contorno, propiedades del material, número de elementos del mallado del trabajo, etcétera; otro archivo destacable es el archivo ODB, que es el archivo donde podemos encontrar la visualización de resultados en la parte de post-procesado.

Además el archivo *.CAE* lo guardamos previamente en la carpeta donde tengamos toda la información del trabajo. En este archivo se encuentran todo el proceso de los parámetros que hemos modificado en el pre-procesado.

5.1. Metodología del modelado en Abaqus/CAE.

5.1.1. Pantalla principal.

Al arrancar el programa cada vez, aparece una pantalla *Start Session* donde podemos elegir el tipo de modelo que queremos crear. Aparecen:

- Modelo Implícito/Explícito.
- Modelo CFD.
- Modelo electromagnético.

Además desde esta pantalla podemos abrir modelo que hemos realizado anteriormente o incluso realizar un pequeño tutorial (Figura 5.1).

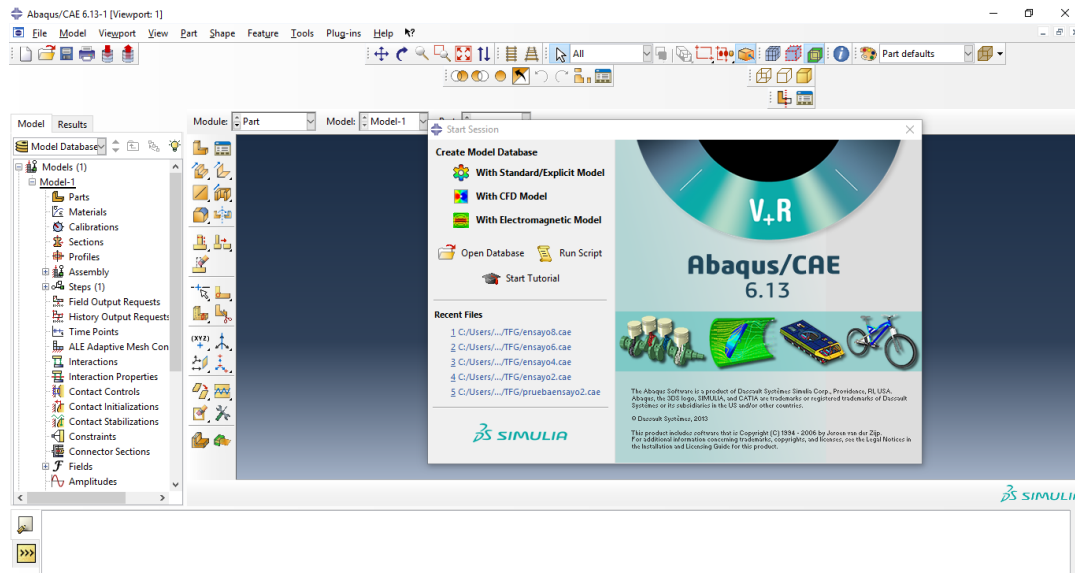


Figura 5.1.-Pantalla principal Abaqus 6.13-1.

Nuestro modelo va a ser un modelo mecánico, pues elegimos la opción *With Standard/Explicit Model*. Este modelo es útil para simular problemas específicos como problemas transitorios, dinámicos y cuasiestáticos no lineales explícitos o problemas generales usando métodos implícitos (Standard).

5.1.2. Geometría.

En el módulo *Part* clicamos en *Create Part* y aparece una pantalla donde podemos elegir:

- Espacio del modelado.
- Tipo de geometría.
- Característica de la base. En función del tipo de geometría, el programa permite diferentes características.

Para nuestro trabajo necesitamos realizar dos geometrías. Para el tocho de material elegimos un espacio de modelado 2D, tipo de geometría deformable y característica por defecto Shell.

La longitud horizontal corresponde con la longitud del diámetro; mientras que la longitud vertical corresponde con el radio (Figura 5.2). Además se ha realizado una partición en la parte superior (Figura 5.3). Las longitudes horizontal y vertical las calculamos:

$$L_h = \pi D \quad (35)$$

$$L_v = \frac{D}{2} = R \quad (36)$$

Por otro lado la dimensión de la partición corresponde con el avance de la herramienta (Figura 5.3).

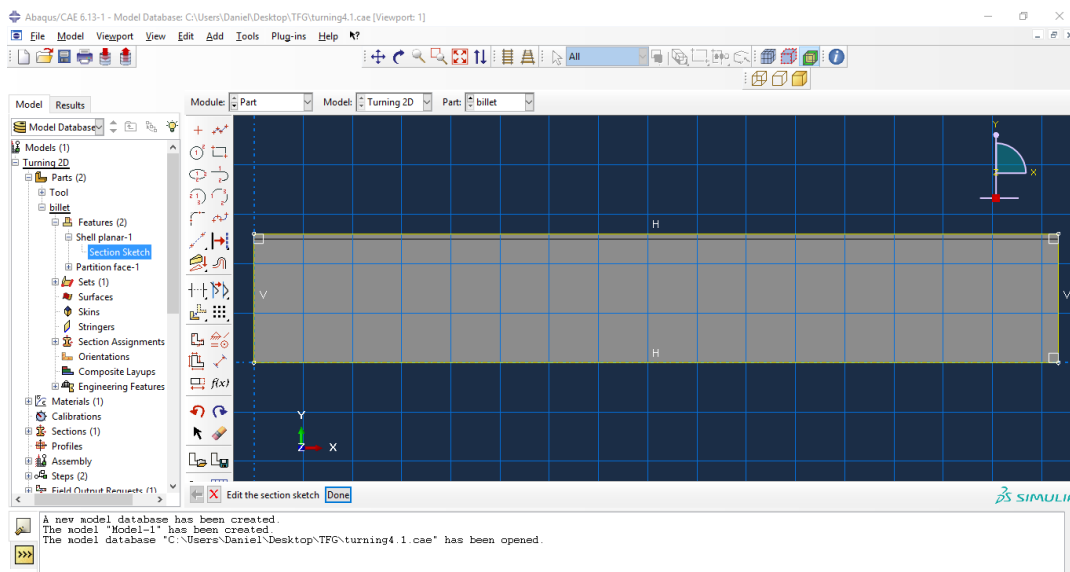


Figura 5.2.-Sketch de la pieza de trabajo.

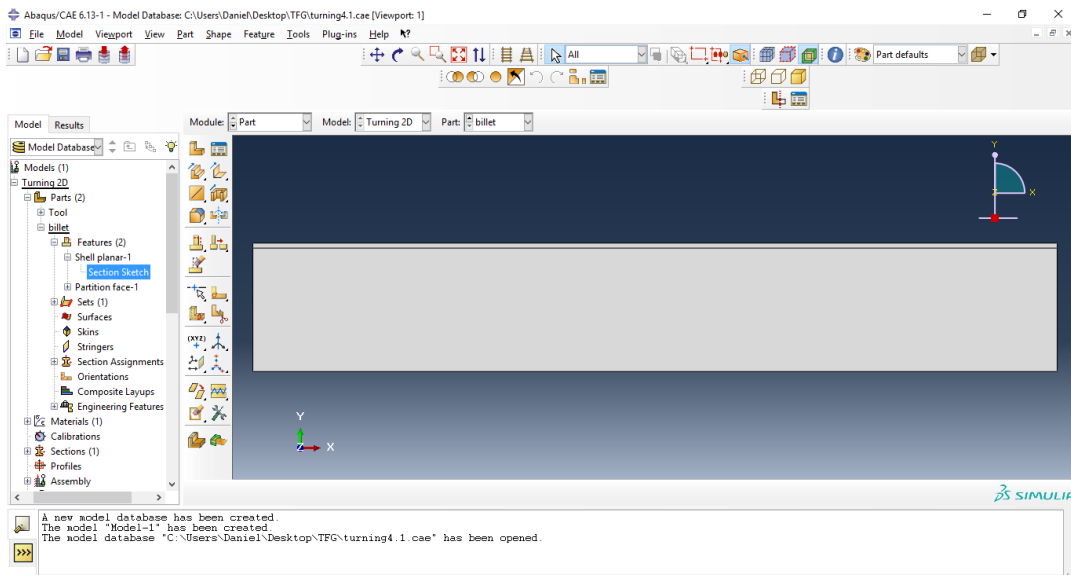


Figura 5.3.-Partición en la pieza de trabajo.

Para la herramienta elegimos un espacio de modelado 2D, tipo de geometría rígida analítica y característica alambre. Una superficie analítica es una superficie que no se deforma, ni tiene masa ni inercia. La teoría del corte ortogonal supone una herramienta rígida y afilada por lo que hemos considerado correcto seleccionar ese tipo de geometría. Además hemos asignado un punto de referencia a la herramienta. El movimiento o restricciones que se aplican al punto de referencia del cuerpo rígido son aplicados a toda la superficie rígida (Figura 5.5)

En la geometría los valores de los ángulos de desprendimiento y ángulo de incidencia son 10° y 25° respectivamente. Se representa en la Figura 5.4.

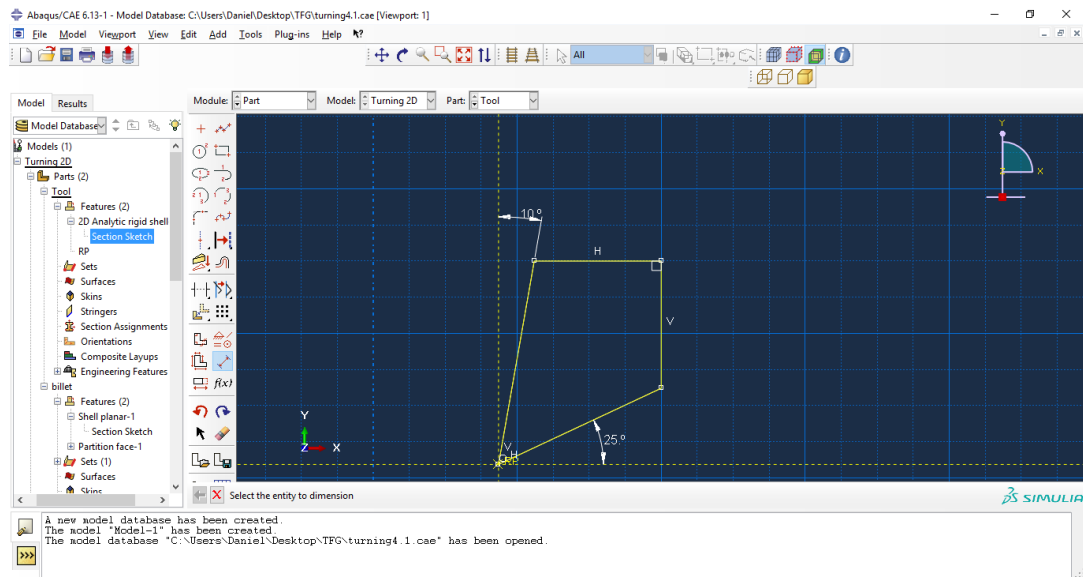


Figura 5.4.-Sketch de la herramienta de trabajo.

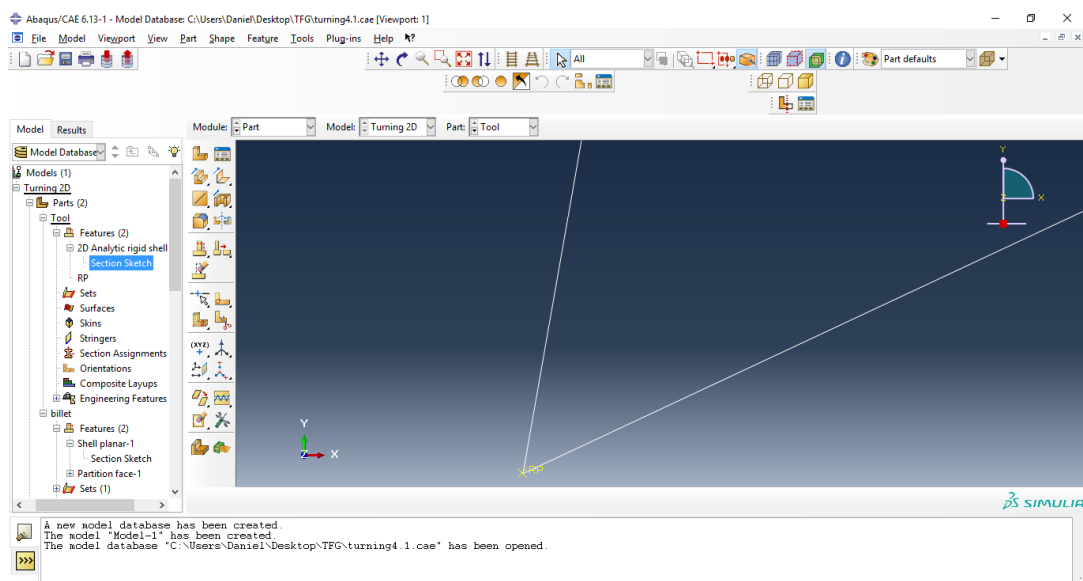


Figura 5.5.-Geometría de la herramienta y punto de referencia (RP).

5.1.3. Preprocesador. Material del tocho de material.

En el módulo *Property*, clicamos en *Create Material*, donde aparece un ventana donde insertamos las propiedades físicas y mecánicas del material de trabajo, así como distintos criterios de plasticidad, tolerancia al daño o efectos del calor.

Hay que tener en cuenta las unidades consistentes de magnitudes que hay que introducir en el programa mostrado en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1.-Unidades consistentes.

	SI	SI(mm)
Longitud	m	mm
Fuerza	N	N
Masa	kg	Tn
Tiempo	s	s
Tensión	Pa	MPa
Energía	J	mJ
Densidad	kg/mm^3	Tn/mm^3

En el presente trabajo hemos optado por coger unidades del SI (mm), tercera columna de la anterior tabla.

Algunas propiedades físicas y mecánicas del material se encuentran en la Tabla 4.1 descrita en el apartado 4.1.

En la pestaña *general* insertamos la densidad.

En la pestaña *Mechanical*→*elasticity*→*elastic* introducimos el modulo elástico y coeficiente de Poisson.

En la pestaña *Mechanical*→*plasticity*→*plastic* insertamos la curva de plasticidad del material. El método de análisis de datos tensión-deformación utilizado en este trabajo ha sido la Ley de Ludwik-Hollomon, en el que el grado de endurecimiento del material viene dado por un exponente n según la ecuación:

$$\sigma_y = k \varepsilon^n \quad (37)$$

siendo σ la tensión real, k una constante del material y ε la deformación plástica real. El exponente de endurecimiento también mide la deformación uniforme máxima antes de que se produzca la estricción localizada y representa la deformación máxima.

El exponente de endurecimiento también está relacionado con la velocidad de endurecimiento por deformación, o flujo plástico, según la ecuación:

$$n = \frac{\varepsilon}{\sigma} \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad (38)$$

El tratamiento de los datos tensión-deformación de los ensayos de tracción muestra que las aleaciones de aluminio no tienen una relación de endurecimiento constante, sino que evoluciona a medida que el material se deforma. En la Figura 5.6 se muestra la velocidad de deformación de una aleación de aluminio a temperatura ambiente:

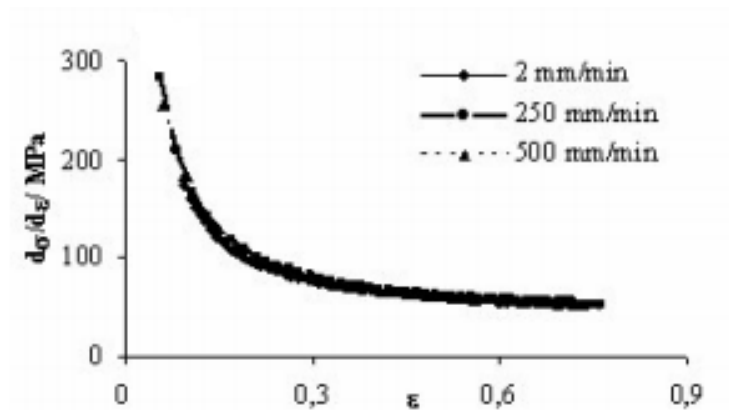


Figura 5.6.-Velocidad de deformación del aluminio a T ambiente (CDAL, 2007)

Según International Journal of Engineering Research and Applications –IJERA– (2013), para el aluminio con el que estamos trabajando, da como valores de n y k , que se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2.-Valores de n y k

n	0.1178
k	370.3072 MPa

Al sustituir estos valores en la Ley de Ludwik-Hollomon (37), obtenemos para distintas deformaciones los siguientes valores de tensión (Tabla 5.3).

Tabla 5.3.-Comportamiento plástico del material.Ley de Ludwik-Hollomon.

ϵ	$\sigma_y(\text{MPa})$
0.01	235
0.025	239.79
0.03	245
0.035	249.99
0.04	253.45
0.045	256.99
0.05	260.20
0.06	265.84

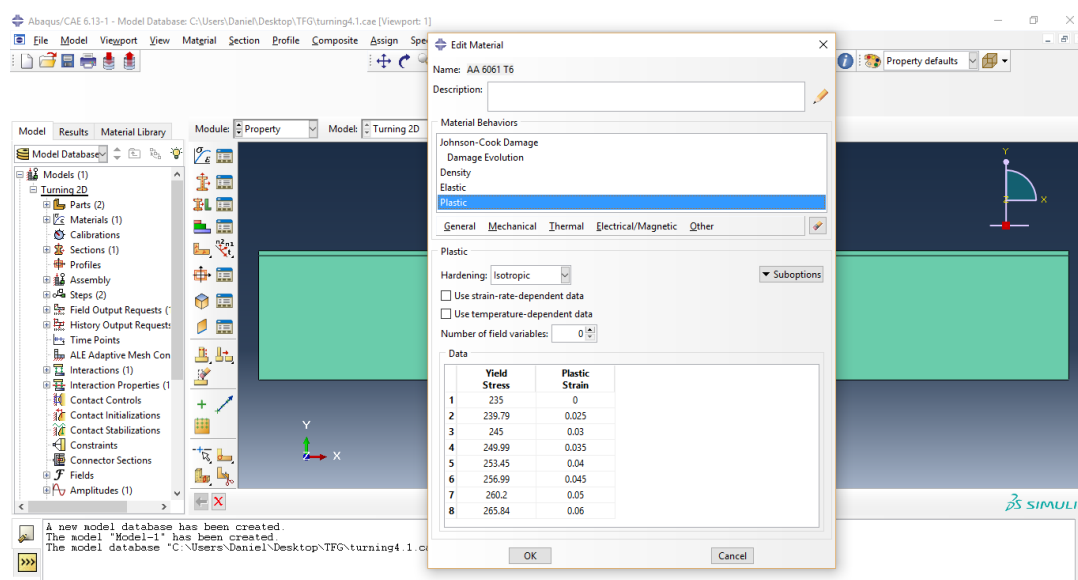


Figura 5.7.-Definición del material Abaqus.

Otro aspecto importante es definir el criterio de fractura del material, para simular correctamente el colapso del material. En la pestaña *Mechanical*→*Damage for Ductile Metals*→*Johnson-Cook Damage* insertamos el criterio de daño. Como criterio de fractura se utilizan expresiones basadas en la acumulación de daño, medido en función de la deformación plástica equivalente o de la energía plástica.

La fractura del material se considera un proceso complejo que agrupa grandes deformaciones, altas velocidades de deformaciones, elevadas tensiones e importantes gradientes térmicos incluidos de manera simultánea en el proceso.

Johnson y Cook, [Johnson-Cook, 1985] proponen un criterio basado en el concepto de “*Continuum Damage Mechanics*” (CDM). Este concepto se basa en el que el daño de los materiales se puede interpretar como la degradación de la resistencia de los mismos debido a los efectos de carga, térmicos y químicos. El proceso se inicia

debido a la aparición de microfracturas o microporos en el seno del material como consecuencia de las imperfecciones aparecidas por los efectos antes nombrados que colapsan el material y producen la fractura.

El estudio del fallo del material fue abordado por el modelo de coalescencia de imperfecciones propuesto por McClintock [McClintock, 1968], el cual aporta los resultados utilizados por Hancock y Mackenzie [Hancock y Mackenzie, 1976] para la proposición de su criterio, que a su vez, es la base del criterio de fallo de Johnson-Cook.

El modelo de Johnson-Cook es una ampliación del modelo de Hancock y Mackenzie, ya que se incluyeron los efectos de la temperatura y la velocidad de deformación, tal y como muestra la siguiente ecuación:

$$\bar{\varepsilon}_f = D_1 + D_2 e^{(D_3 \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}})} \left[1 + D_4 \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0} \right] [1 + D_5 T_h] \quad (39)$$

donde D_i son constantes empíricas del material y T_h es un coeficiente adimensional de temperatura homogénea que se define como:

$$T_h = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (40)$$

siendo T_m la temperatura de fusión del material y T_0 la temperatura ambiente.

Además $\bar{\sigma}$ es un coeficiente de endurecimiento que puede calcularse como:

$$\bar{\sigma} = \frac{d \bar{\sigma}}{d \varepsilon_p} \quad (41)$$

Y $\dot{\varepsilon}_p$ e $\dot{\varepsilon}_0$ son la velocidad de deformación y la velocidad de deformación de referencia, que depende el material.

Los valores de las diferentes constantes dados por Matweb se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4.-Constantes empírica del material para Johnson-Cook.

Parámetro	Aluminio
D_1	-0.77
D_2	1.45
D_3	-0.47
D_4	0
D_5	1.6
$T_{fusión}$	905
$T_{transición}$	300
$\dot{\epsilon}_0$	0.001

Adicionalmente podemos añadir la evolución del daño mediante desplazamiento o energía. Para nuestro caso hemos elegido que la evolución del daño se determina a partir de la energía requerida necesaria para crear una grieta en el material. Según Matweb, el valor de la energía de fractura para el aluminio que estamos trabajando es:

$$\text{Energía fractura} = 157.614 \text{ N/mm}$$

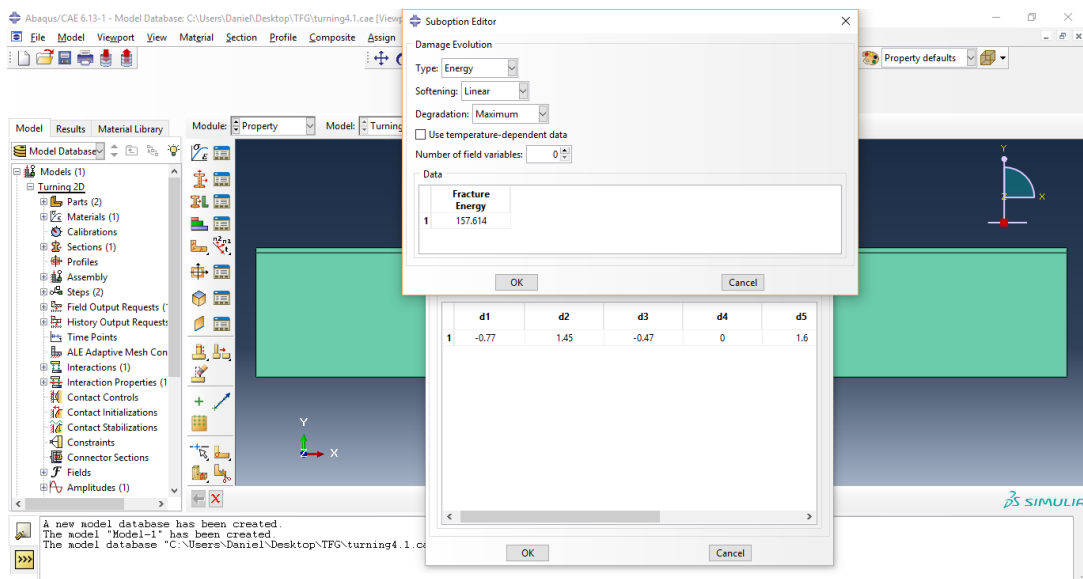


Figura 5.8.-Constantes de Johnson-Cook en Abaqus.

Seguimos en el módulo *Property* clicando ahora el botón de *Create Section* para crear la sección del material aluminio eligiendo como categoría sólida y tipo homogénea. Por último queda asignar esa sección de aluminio a la pieza de trabajo, cambiando en ese momento de color la pieza de trabajo, pasando a color verde (Figura 5.9).

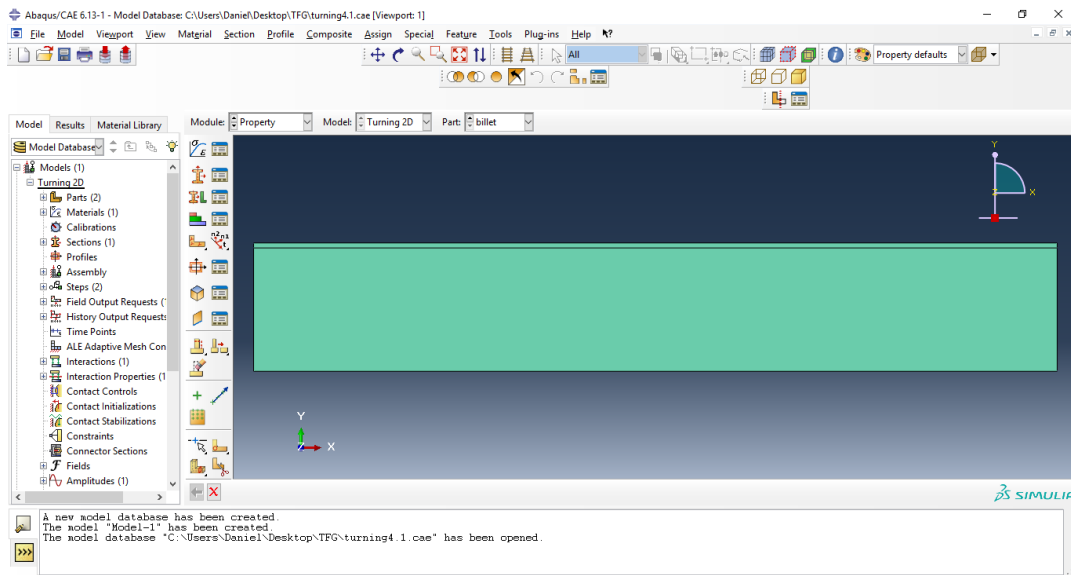


Figura 5.9.-Asignación de la sección a la pieza de trabajo.

5.1.4. Preprocesado. Ensamblaje del modelo.

En el módulo *Assembly* definimos la geometría del modelo final, insertando el material de trabajo, y mediante ubicación relativa insertamos la herramienta, formando el modelo en un sistema global de coordenadas. Esto ocurre porque cada parte está creada en su propio sistema de coordenadas e independiente de las otras partes o piezas del modelo (Figura 5.10).

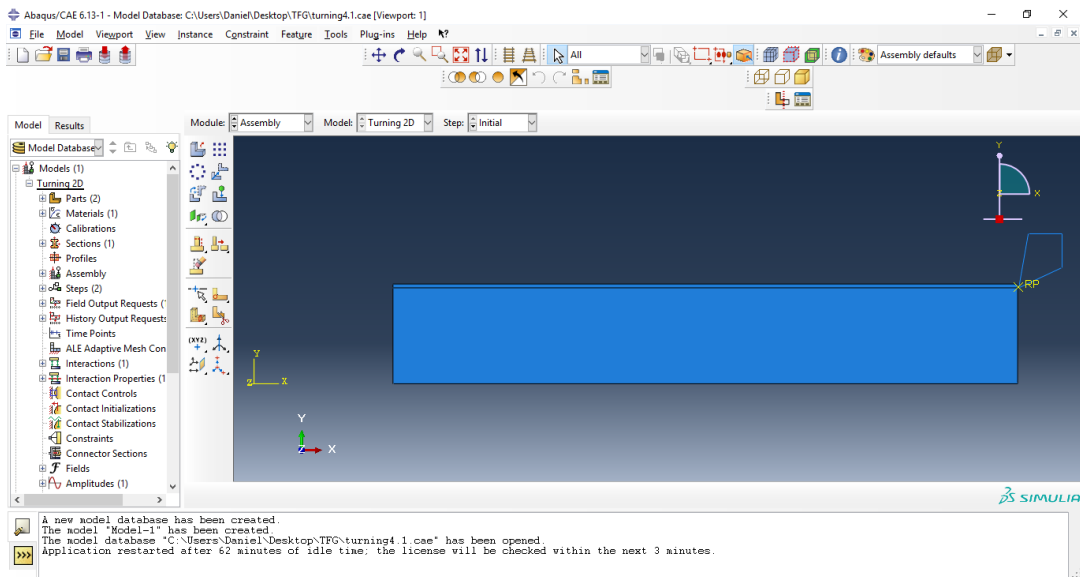


Figura 5.10.-Ensamblaje del modelo en Abaqus.

5.1.5. Preprocesado. Creación del Step.

En el módulo *Step* creamos las características de cada proceso por medio de un paso de tiempo o step. A partir de la velocidad de corte y la longitud que se mecaniza obtenemos el tiempo que tarda la herramienta en recorrer esa longitud.

Abaqus crea un step por defecto, en el que se estudia el estado de los parámetros cuando no existe interacción entre ellos (Figura 5.11).

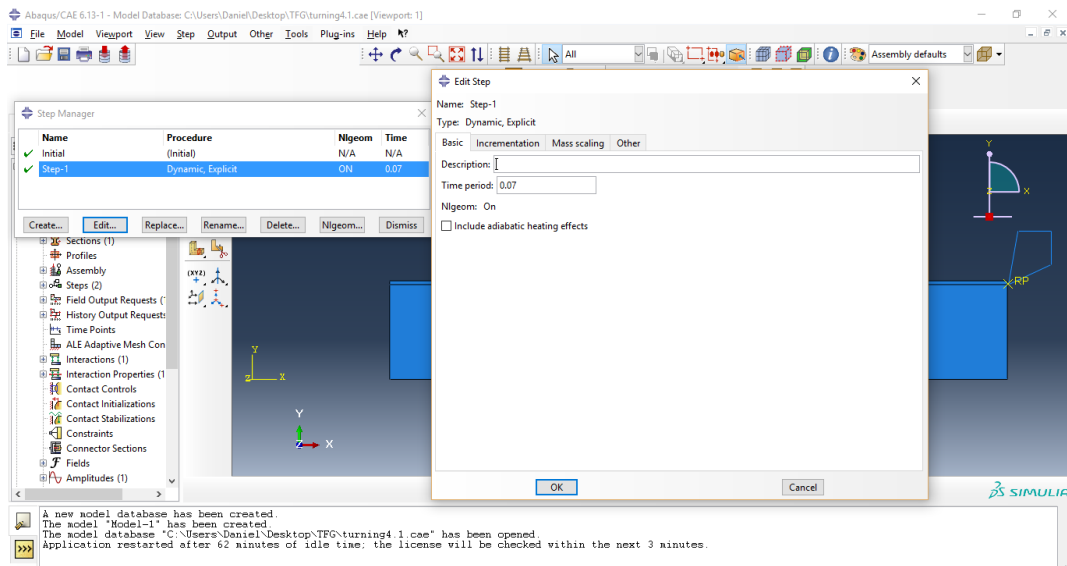


Figura 5.11.-Creación del Step en Abaqus.

5.1.6. Preprocesado. Interacción del modelo.

En el módulo *Interaction* se definen las interacciones y contactos entre las piezas del modelo. Insertamos dos tipos de contacto (Figura 5.12):

- Fricción entre partes.
- Contacto entre las superficies de la pieza de trabajo y la herramienta. Para ello, se opta por *surface-to-surface contact*.

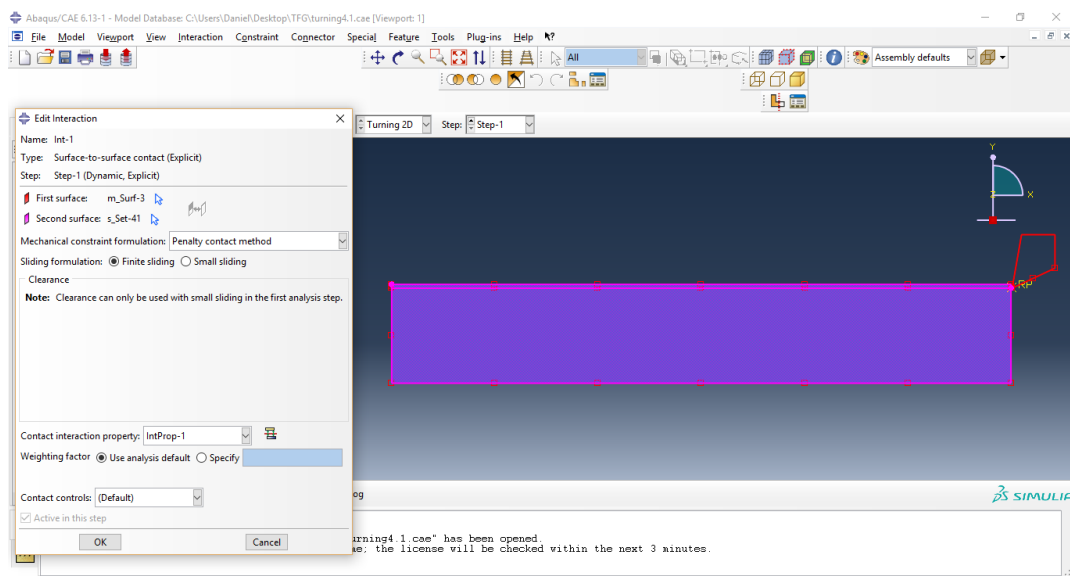


Figura 5.12.-Definición del contacto entre la pieza de trabajo y herramienta.

5.1.7. Preprocesado. Condiciones de contorno.

En el módulo *Load* añadimos las condiciones de contorno tanto de la pieza de trabajo como la herramienta.

En el caso de la pieza de material de trabajo se ha empotrado en su parte inferior, restringiendo los desplazamientos y giros en los tres ejes. En la Figura 5.13, se ve como se muestra la inclusión de las condiciones de contorno.

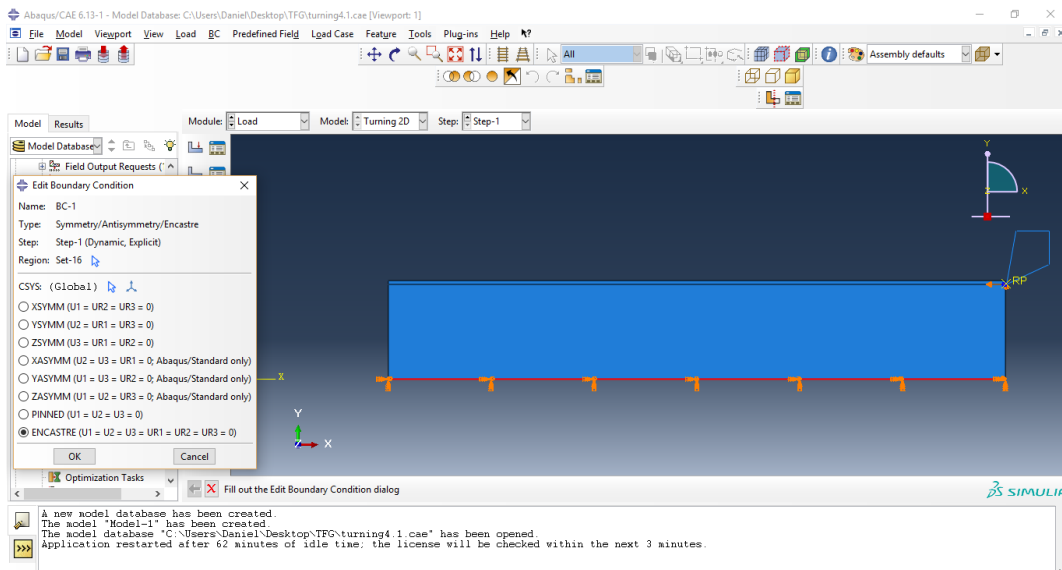


Figura 5.13.-Condiciones de contorno de la pieza de trabajo en Abaqus.

En el caso de la herramienta, le imponemos como condición de contorno un desplazamiento lineal a lo largo de la pieza. En este caso al ser una superficie analítica, la condición de contorno es aplicada al punto de referencia creado cuando se creó la geometría de la herramienta. Al ser un desplazamiento lineal tenemos que definir una amplitud del movimiento y para ello definimos una amplitud lineal, tomando cuando llegue al final de step el valor de la función del desplazamiento valga uno (Figura 5.14)

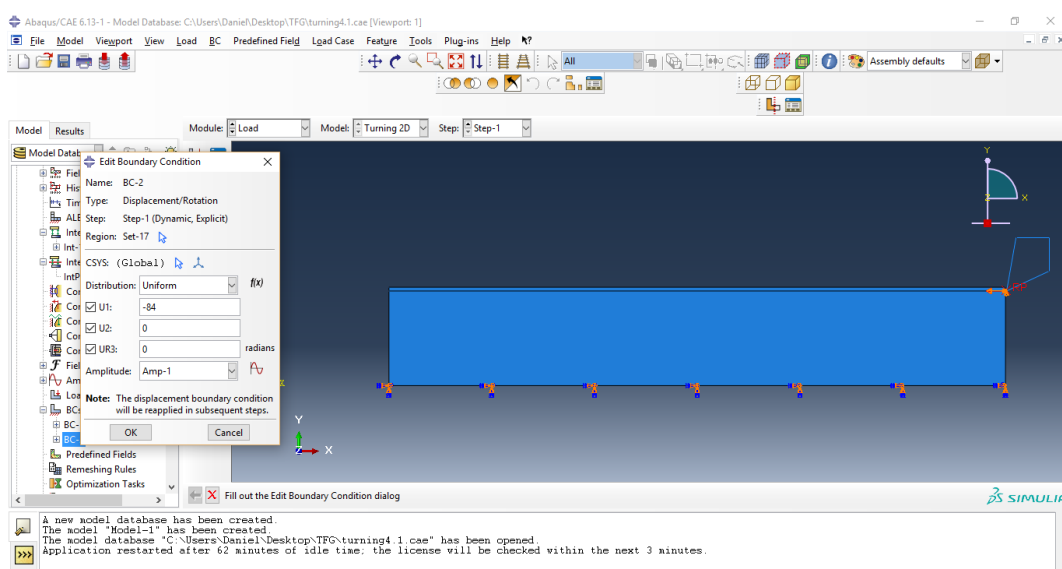


Figura 5.14.-Condiciones de contorno de la herramienta en Abaqus.

5.1.8. Preprocesado. Mallado del modelo.

Una vez definida todas las condiciones de la operación, vamos a mallar el modelo. Primeramente, clicamos en *Seed Edges* para la creación de los nodos o semillas del tocho de material. Hemos elegido un formato de semillas progresivo con el objetivo que en la zona de mayor importancia donde queremos analizar las fuerzas de corte, que es la zona por donde la herramienta se desplaza, la malla esté refinada y haya más precisión en los cálculos (Figuras 5.15 y 5.16).

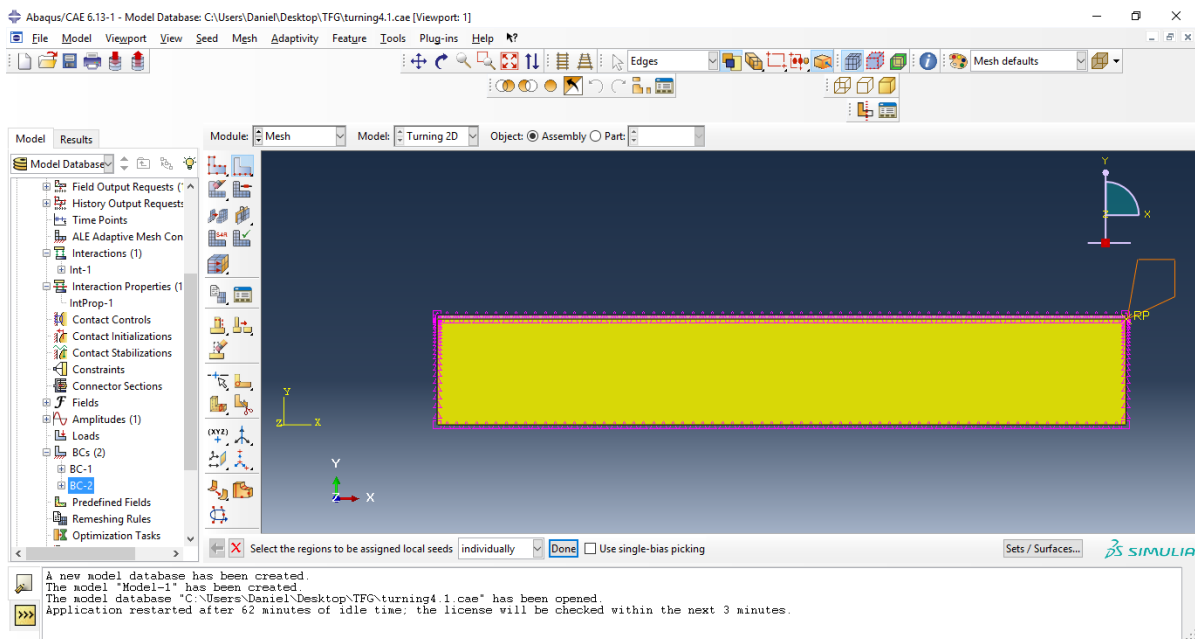


Figura 5.15.-Semillado del modelo de trabajo en Abaqus.

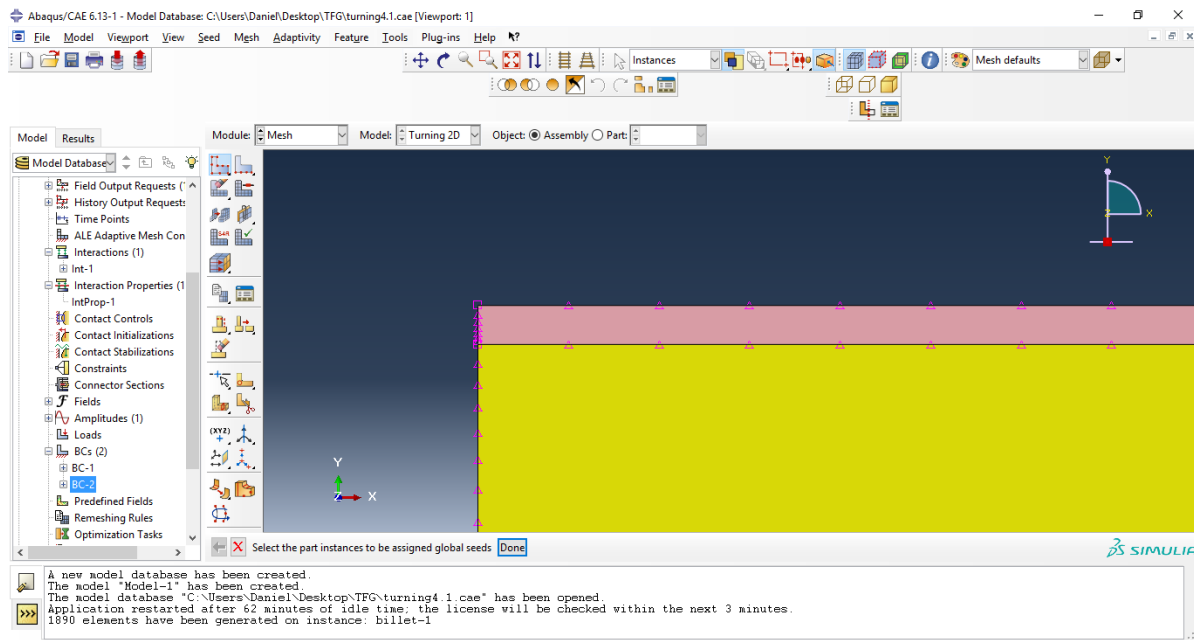


Figura 5.16.-Detalle del semillado progresivo en Abaqus.

A continuación elegimos elementos cuadráticos con eliminación de elementos e integración reducida llamados elementos CPS4R, generándose 1890 elementos en la pieza de trabajo.

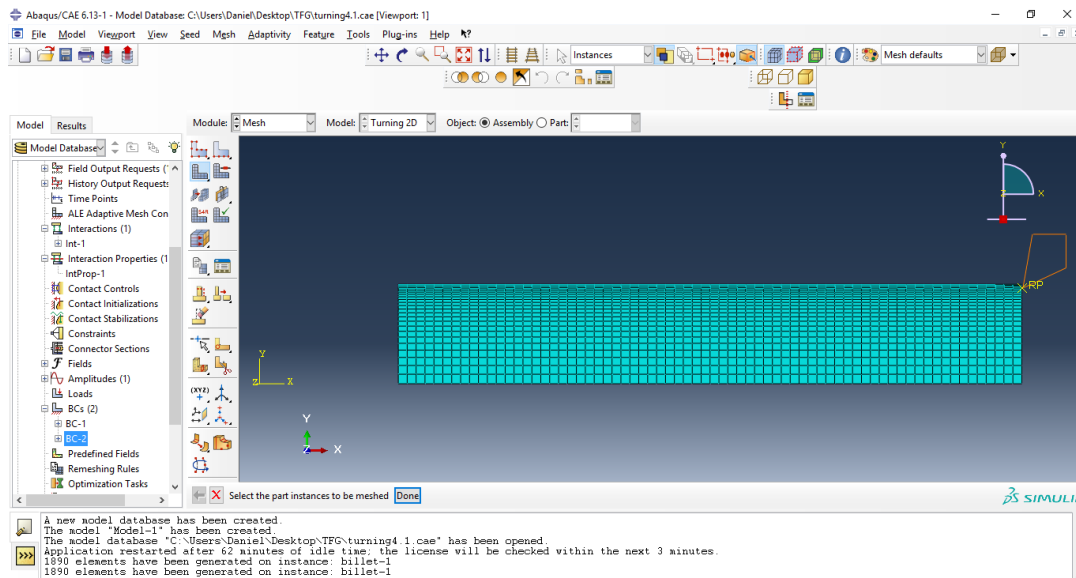


Figura 5.17.-Mallado del modelo en Abaqus.

5.1.9. Procesado. Creación del “job”.

En el módulo *Job* clicamos *Create Job* donde podemos definir el tipo de análisis que queremos analizar, así como la precisión en los cálculos entre otros parámetros (5.18).

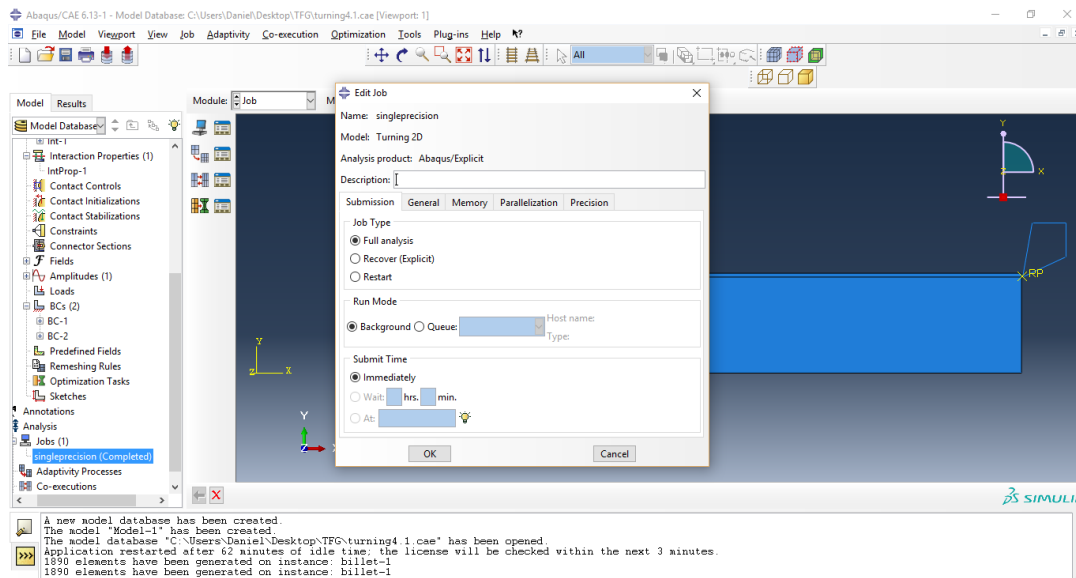


Figura 5.18.-Creación del Job de análisis en Abaqus.

Una vez creado, clicamos *Job Manager* y aparece una ventana flotante donde le damos a analizar (*submit*) empezando aquí el análisis. Si pulsamos *Monitor* podemos seguir los pasos de la simulación, pues muestra los distintos pasos de tiempo que definimos en el módulo *Step*, además de posibles errores o avisos que puede generar el modelo que hemos creado (Figura 5.19).

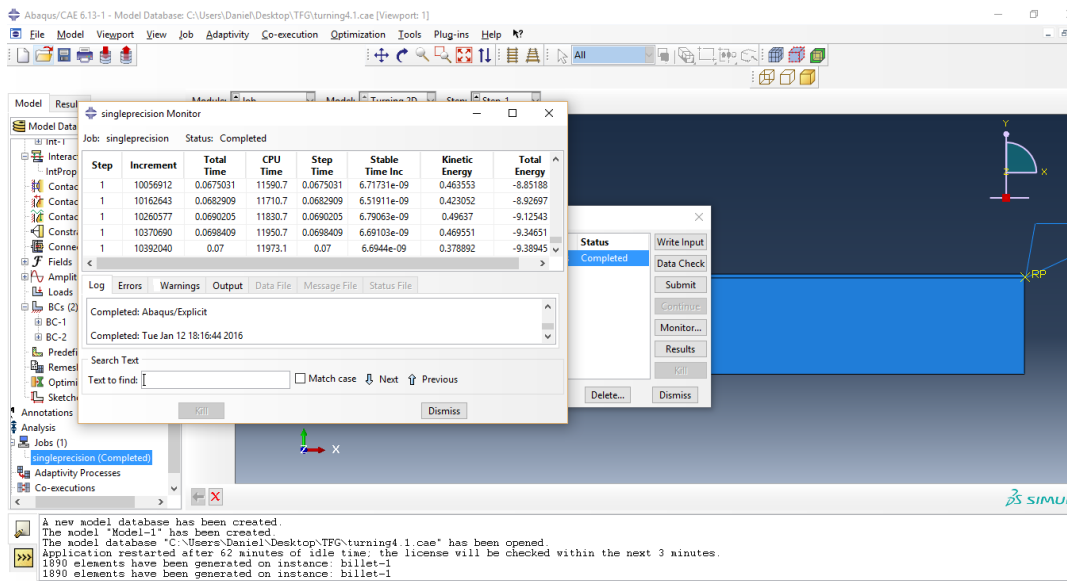


Figura 5.19.-Monitor de análisis del modelo en Abaqus.

5.1.10. Postprocesado. Visualización de resultados.

Una vez ha terminado el análisis, cerramos el monitor de la simulación y clicamos en *Results* para visualizar los resultados calculados en la simulación. En esta ventana podemos visualizar tensiones, deformaciones, deformaciones, fuerzas entre otras variables de salida que ha calculado durante el análisis. Además podemos representar en gráficos distintas variables. La visualización de los resultados se muestran en la Figuras 5.20. y 5.21.

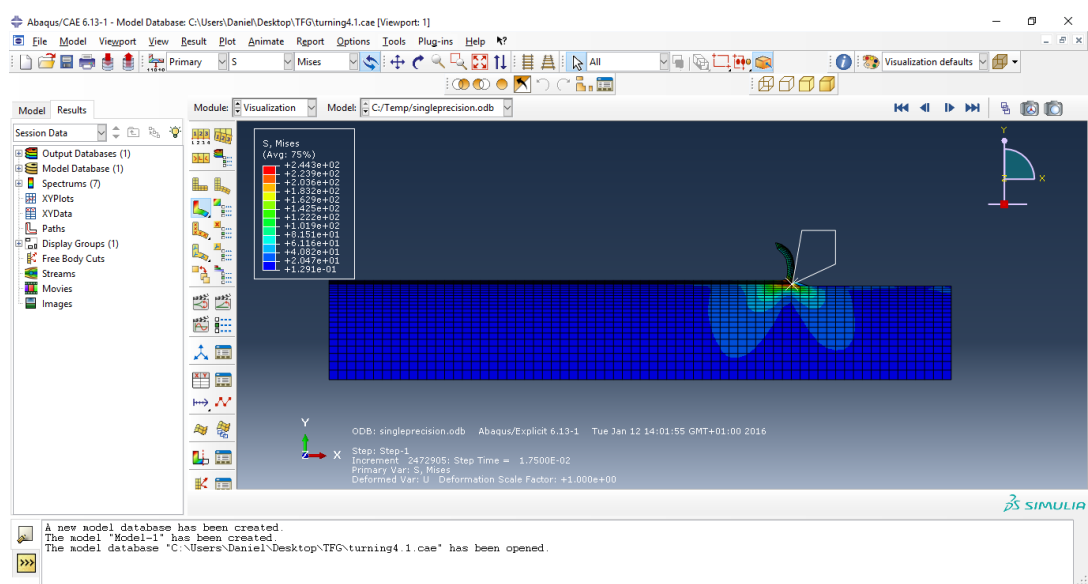


Figura 5.20.-Visualización de resultados en Abaqus.

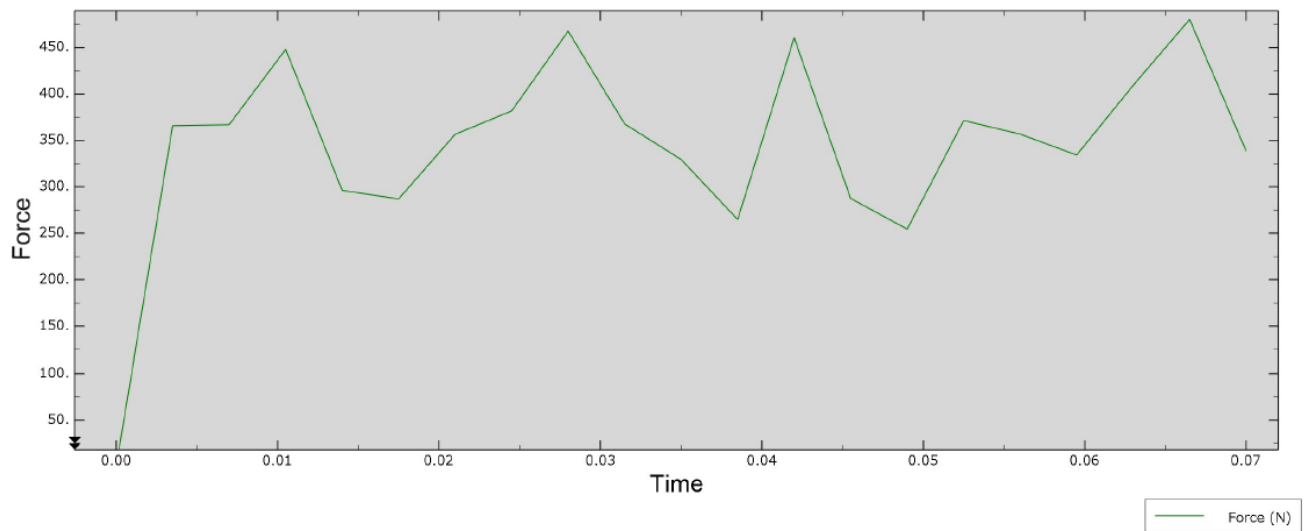


Figura 5.21.- Representación de resultados.

En la gráfica anterior (Figura 5.21) se representa la distribución de fuerzas de la herramienta sobre el tocho de material en función del tiempo.

6. CÁLCULOS, SIMULACIONES Y ENSAYOS.

6.1. Cálculo analítico.

Los métodos analíticos que hemos usado para calcular la fuerza de corte son la Ley de Ernst y Merchant (sección 3.1.1) y Segunda Ley de Merchant (sección 3.1.2).

6.1.1. Ley de Ernst y Merchant.

La fuerza de corte la calculamos con la ecuación:

$$F_c = \frac{\tau A \cos(\beta - \alpha)}{\sin \varphi \cos(\varphi + \beta - \alpha)} \quad (42)$$

6.1.2. Segunda Ley de Merchant.

La ecuación usada para calcular la fuerza de corte es:

$$F_c = \tau A [\cot \varphi \tan(C - \varphi) - 1] \quad (43)$$

6.1.3. Resultado analíticos.

Los datos que usamos son:

$$A = t_0 w \quad (44)$$

$$\alpha = 10^\circ \quad (45)$$

En la tabala 4.2. está definida la resistencia a la cizalladura $\tau = 186 \text{ MPa}$.

Con el coeficiente de fricción, podemos calcular el valor del ángulo de fricción β . El coeficiente de fricción que propone Sears & Zemansky (2009) entre el material de la herramienta y la pieza es $\mu = 0.61$.

$$\beta = \arctan 0.61 = 31.4^\circ \quad (46)$$

Mediante la ecuación de Merchant, calculamos φ :

$$\varphi = \frac{C}{2} + \frac{\alpha - \beta}{2} = 25 + \frac{10 - 31.4}{2} = 14.3^\circ \quad (47)$$

La constante C se encuentra tabulado en la tabla 3.1 y para el aluminio $C = 50^\circ$. Hemos calculado la fuerza de corte para diferentes condiciones de corte, que se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1.-Fuerzas de corte analíticas.

Ensayo	$t_0(mm)$	$p(mm)$	$N(rpm)$	$v_c(\frac{m}{min})$	<i>Ernst & Merchant(N)</i>	<i>Merchant(N)</i>
1	0.1	1	2000	175.93	86.27	33.77
2	0.2	1	2000	175.93	172.56	67.55
3	0.1	1	860	70.25	86.27	33.77
4	0.2	1	860	70.25	172.56	67.55
5	0.1	2	2000	175.93	172.56	67.55
6	0.2	2	2000	175.93	345.11	135.11
7	0.1	2	860	70.25	172.56	67.55
8	0.2	2	860	70.25	345.11	135.11

6.2. Fuerzas de corte mediante FEM.

En el apartado 5 se ha explicado el procedimiento para calcular la fuerza de corte mediante el método de elementos finitos con el software Abaqus 6.13-1.

La Tabla 6.2 muestra las condiciones de corte que han sido simuladas para los ensayos en Abaqus 6.13-1.

Tabla 6.2.-Parámetros de corte en Abaqus CAE.

Ensayo	$t_0(mm) \equiv Avance$	<i>Profundidad (mm)</i>	$N(rpm)$	$t(s)$
1	0.1	1	2000	0.03
2	0.2	1	2000	0.03
3	0.1	1	860	0.07
4	0.2	1	860	0.07
5	0.1	2	2000	0.03
6	0.2	2	2000	0.03
7	0.1	2	860	0.07
8	0.2	2	860	0.07

6.3. Cálculo experimental.

Los parámetros de corte que se ha utilizado en el proceso de torneado para medir las fuerzas de corte en el taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Jaén están definidos en la Tabla 6.3. La pieza de trabajo empleado es de AA 6063 y la herramienta de HSS M2 (acero rápido). Primeramente se hizo una pasada de limpieza de 1 mm de profundidad. Seguidamente se hicieron los ocho ensayos propuestos.

Tabla 6.3-Parámetros de corte usados en el taller.

<i>Ensayo</i>	<i>Diámetro (mm)</i>	<i>Profundidad de pasada (mm)</i>	<i>Avance (mm/rev)</i>	<i>N(rpm)</i>
1	28	1	0.1	2000
2	28	1	0.2	2000
3	26	1	0.1	860
4	26	1	0.2	860
5	28	2	0.1	2000
6	28	2	0.2	2000
7	26	2	0.1	860
8	26	2	0.2	860

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS. VALIDACIÓN.

La validación del trabajo se ha llevado a cabo mediante el error relativo de la fuerza de corte numérico respecto al valor de la fuerza de corte medida experimentalmente.

En los ensayos en los que la profundidad de pasada es de 2 mm, el valor medio de la fuerza de corte que está representado en gráficos posteriores es ligeramente superior al valor de fuerza experimental debido a que se creó un modelo 2D de corte ortogonal y no estiman fielmente el valor de la fuerza.

Por otra parte, Abaqus CAE no simula con veracidad el rozamiento entre herramienta y pieza de trabajo, y aunque define un coeficiente de fricción, este se refiere al grado de fricción entre los nodos creados en la pieza de trabajo. La solución que se implementó fue introducir un valor para ese coeficiente que fuera óptimo para el cálculo de la fuerza de corte.

7.1. Ensayo 1.

En este ensayo las condiciones de corte para los métodos analíticos, numéricos y experimentales son: diámetro de la pieza 28 mm, velocidad de avance 0.1 mm/rev, velocidad de corte 2000 rpm (175.93 m/min) y profundidad de pasada 1 mm.

La fuerza de corte en el método analítico se muestran en la Tabla 6.1. En la Figura 7.1 se muestran los datos obtenidos mediante el software Abaqus CAE. Esta fuerza corresponde con el valor de la fuerza que aparece al mecanizar una revolución de la pieza de trabajo.

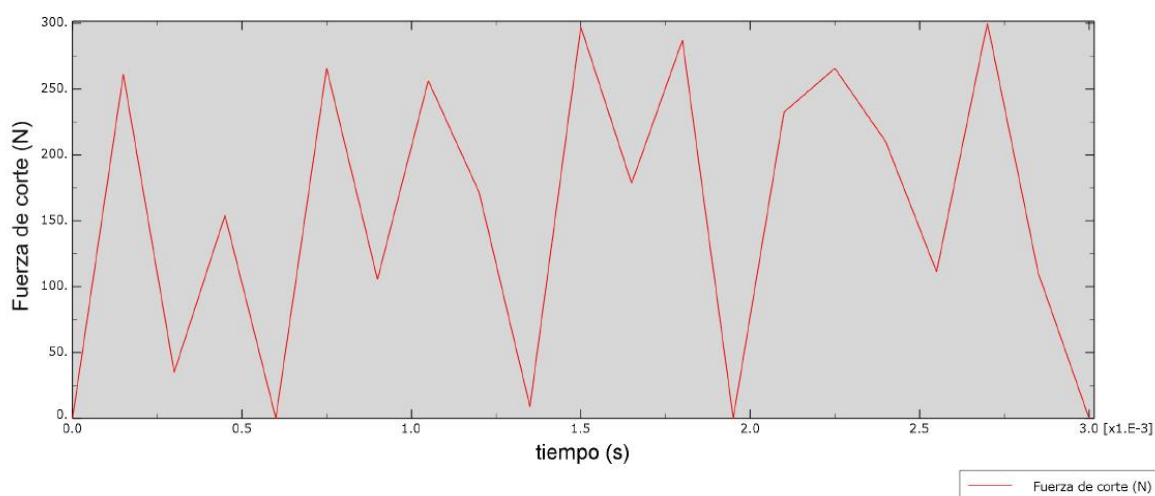


Figura 7.1.-Fuerza de corte del ensayo 1. Abaqus.

En la Figura 7.2 se muestra la comparación de los distintos métodos con respecto al experimental. Para ello se ha calculado el error relativo de cada método y se ha representado en un gráfico de columnas.

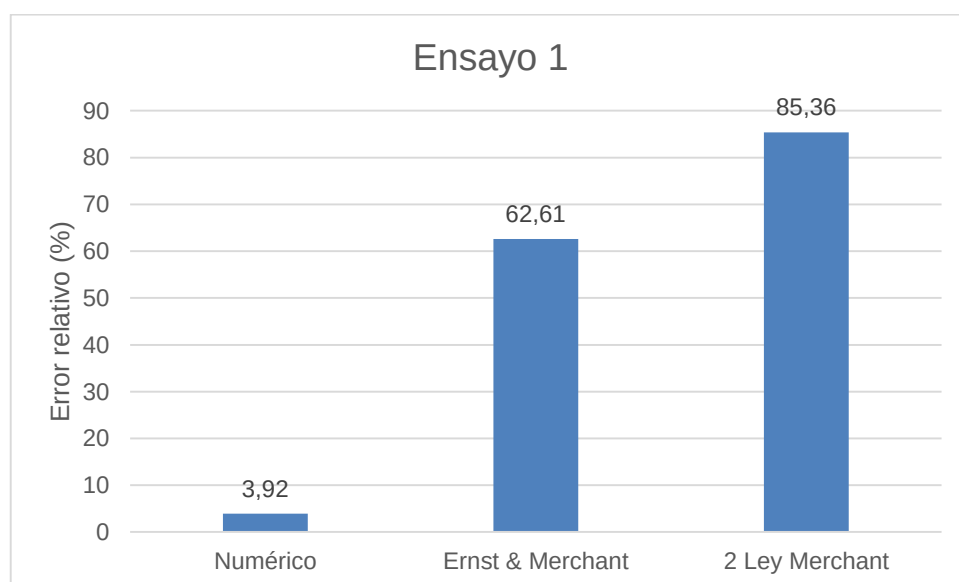


Figura 7.2.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 1.

7.2. Ensayo 2.

En este ensayo las condiciones de corte para los métodos analíticos, numéricos y experimentales son: diámetro de la pieza 28 mm, velocidad de avance 0.2 mm/rev, velocidad de corte 2000 rpm (175.93 m/min) y profundidad de pasada 1 mm.

El valor de la fuerza de corte mediante los métodos analíticos se muestran en la tabla 6.1.

En la figura 7.3 se muestra los datos obtenidos en el software Abaqus CAE en la que como el caso anterior, la fuerza de corte está estimada para una revolución de la pieza de trabajo.

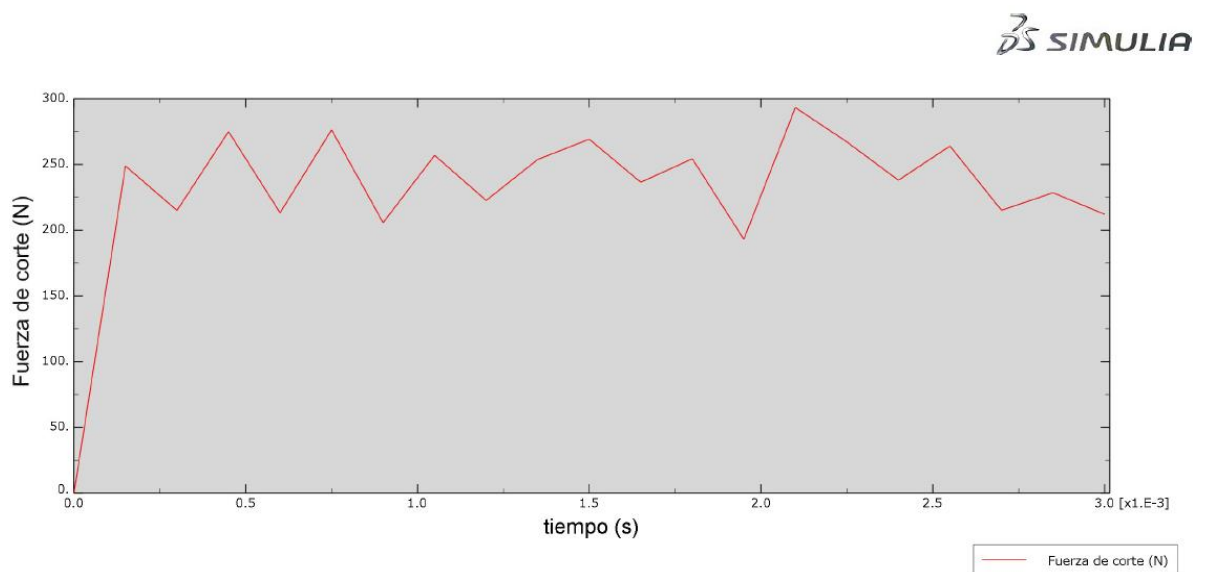


Figura 7.3.-Fuerza de corte del ensayo 2. Abaqus.

La comparación de los distintos métodos se muestra en la figura 7.4.

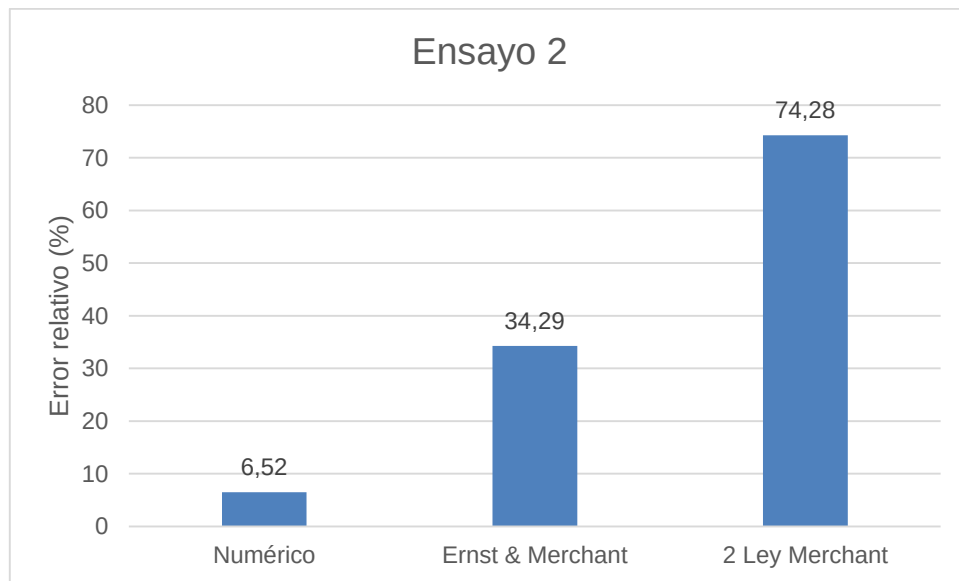


Figura 7.4.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 2.

El valor de la fuerza de corte en el método numérico es bastante próximo al valor experimental, alejándose el valor de la fuerza en los métodos analíticos con respecto al valor experimental, como se puede observar en la Figura 7.4 con los errores relativos a la fuerza experimental.

6.3. Ensayo 3.

En este ensayo las condiciones de corte para los métodos analíticos, numéricos y experimentales son: diámetro de la pieza 26 mm, velocidad de avance 0.1 mm/rev, velocidad de corte 860 rpm (70.25 m/min) y profundidad de pasada 1 mm.

El valor de la fuerza de corte mediante los métodos analíticos se muestran en la tabla 6.1. Los resultados obtenidos en Abaqus CAE se muestran en la figura 7.5.

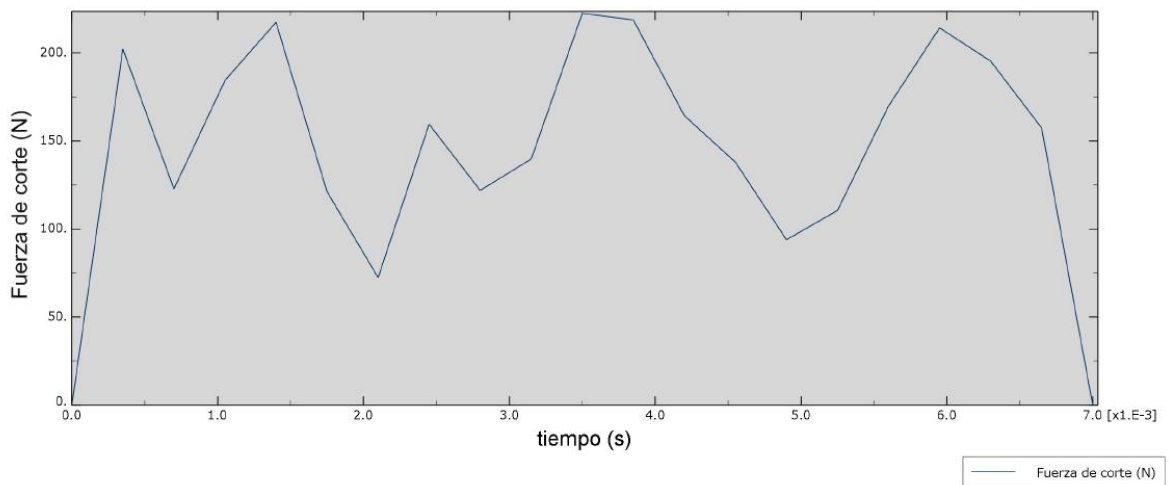


Figura 7.5.-Fuerza de corte del ensayo 3. Abaqus.

Por último, la comparación entre los distintos se muestra en la figura 7.6.

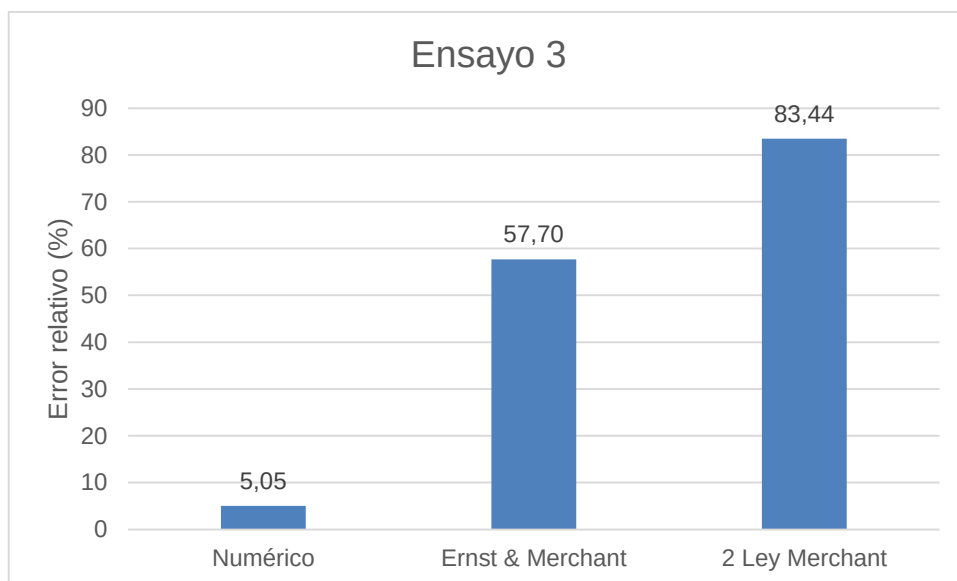


Figura 7.6.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 3.

El error relativo del método numérico es pequeño, por lo que se aproxima a la fuerza experimental.

7.4. Ensayo 4.

En este ensayo las condiciones de corte para los métodos analíticos, numéricos y experimentales son: diámetro de la pieza 26 mm, velocidad de avance 0.2 mm/rev, velocidad de corte 860 rpm (70.25 m/min) y profundidad de pasada 1 mm.

El valor de la fuerza de corte mediante los métodos analíticos se muestran en la tabla 6.1. En la figura 7.7 se muestran en los resultados obtenidos en el análisis numérico.

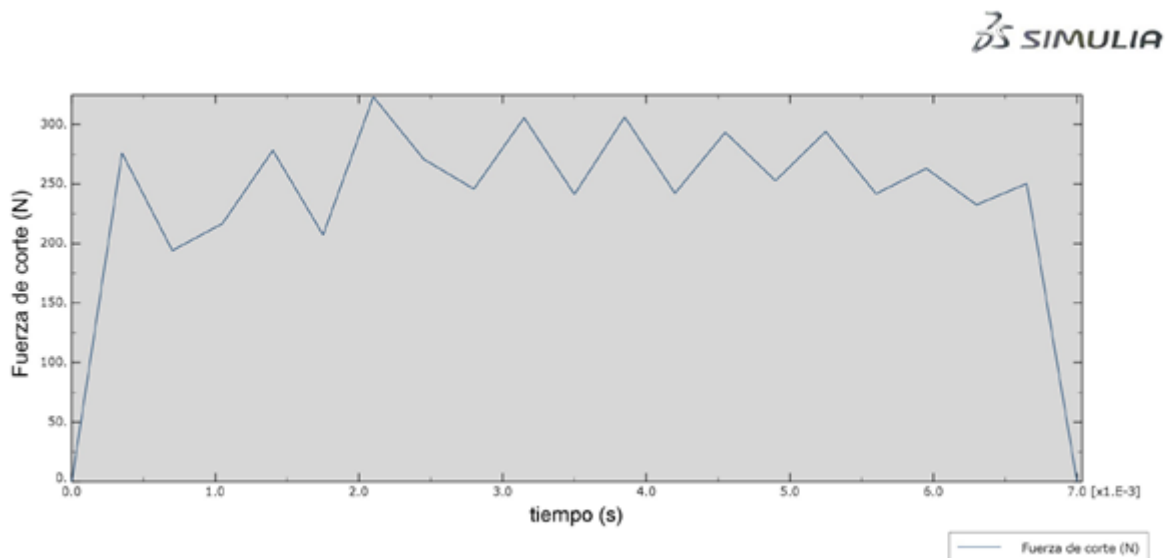


Figura 7.7.-Fuerza de corte del ensayo 4. Abaqus.

La comparación de los distintos métodos se muestran en la figura 7.8.

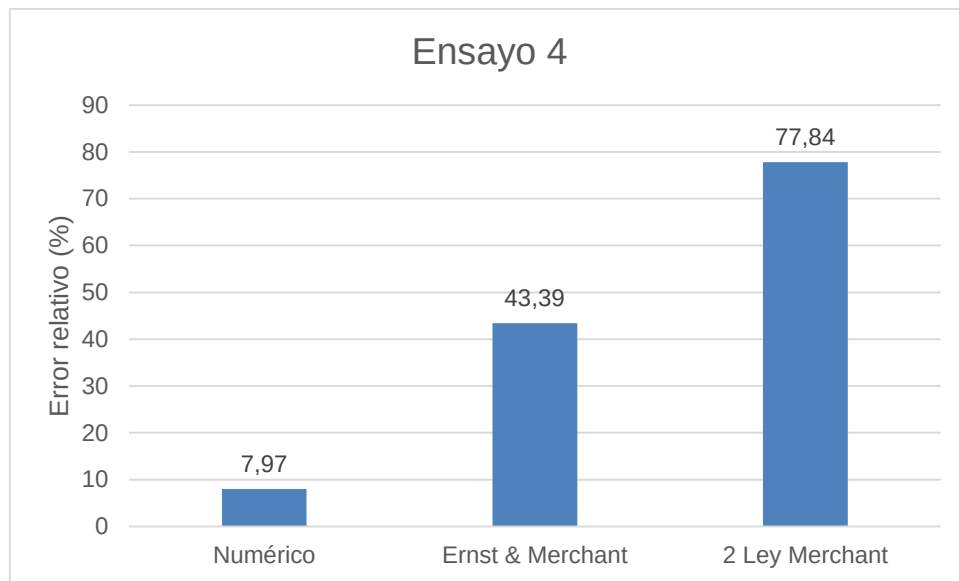


Figura 7.8.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 4.

Al igual que en el ensayo 2, el valor de la fuerza experimental y numérica se aproxima bastante, no siendo preciso el valor en los métodos analíticos.

6.5. Ensayo 5.

Los condiciones de corte en este ensayo son las mismas que el ensayo 1, excepto la profundidad de pasada que aumentamos a 2 mm.

El valor de la fuerza de corte mediante los métodos analíticos se muestran en la tabla 6.1. La figura 7.9 muestra los valores obtenidos en Abaqus CAE.

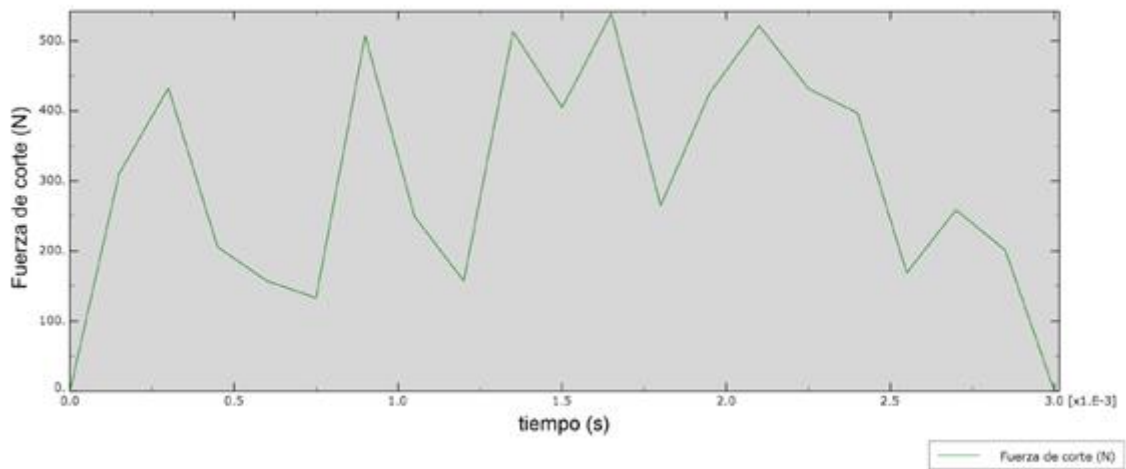


Figura 7.9.-Fuerza de corte del ensayo 5. Abaqus.

La comparación entre los distintos métodos seguidos se muestra en la figura 7.10.

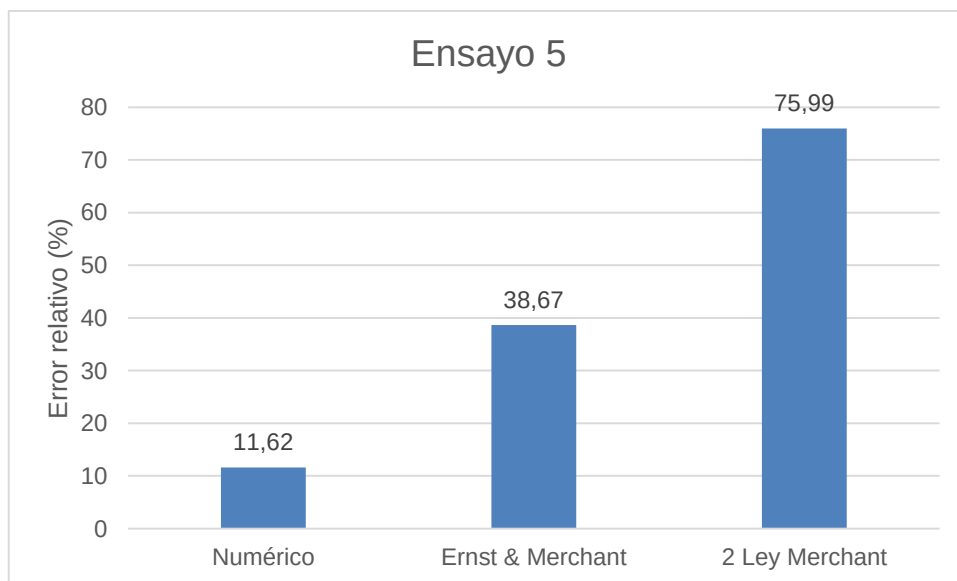


Figura 7.10.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 5.

El valor de la fuerza de corte en el método numérico es ligeramente superior al experimental, siendo el error aceptable; mientras que en los métodos analíticos el valor de la fuerza no se acerca al valor experimental.

6.6. Ensayo 6.

Las condiciones de corte en este ensayo son las mismas que en el ensayo 2 con la excepción de la profundidad de pasada que ahora vale 2 mm.

El valor de la fuerza de corte obtenida mediante los métodos analíticos se muestran en la tabla 6.1. La figura 7.11 muestra los valores obtenidos en Abaqus CAE.

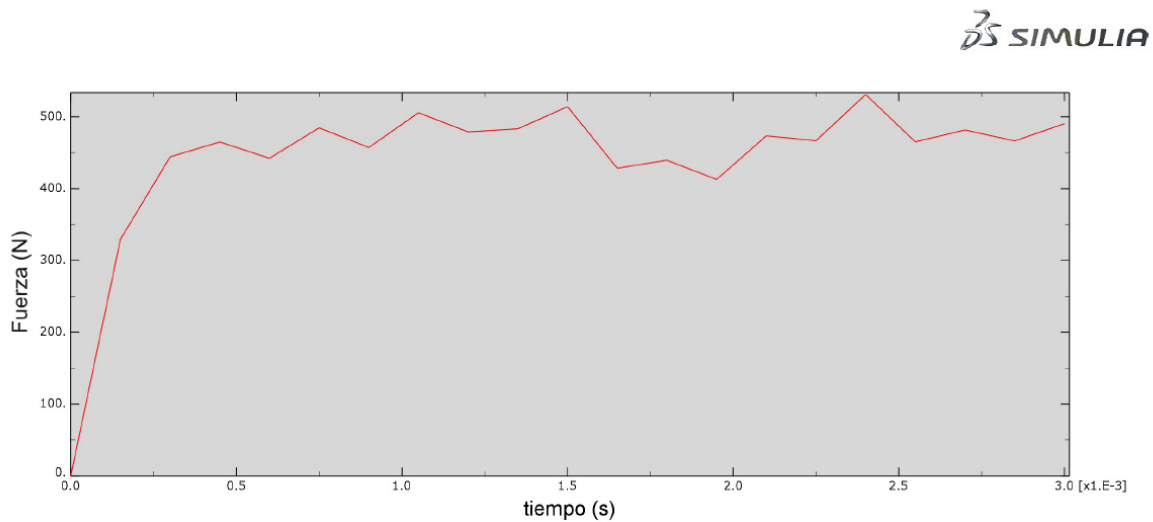


Figura 7.11.-Fuerza de corte del ensayo 6. Abaqus.

La comparación de los distintos métodos se muestra en la figura 7.12.

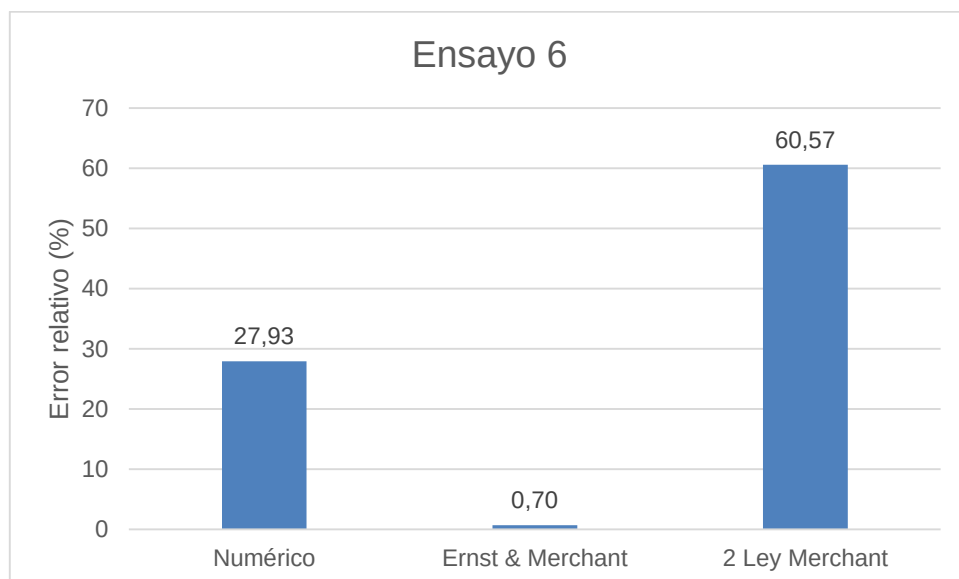


Figura 7.12.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 6.

En este caso el valor numérico sale ligeramente mayor, mientras en el método analítico de Ernst y Merchant se aproxima bastante al valor experimental de la fuerza de corte, por lo que la profundidad de pasada es un factor influyente en esta aproximación.

7.7. Ensayo 7.

Las condiciones de corte en este ensayo son las mismas que en el ensayo 3 con la excepción de la profundidad de pasada que ahora vale 2 mm.

En la tabla 6.1 se muestran los valores obtenidos analíticamente. En la figura 7.13 se muestran los datos procedente de Abaqus CAE.

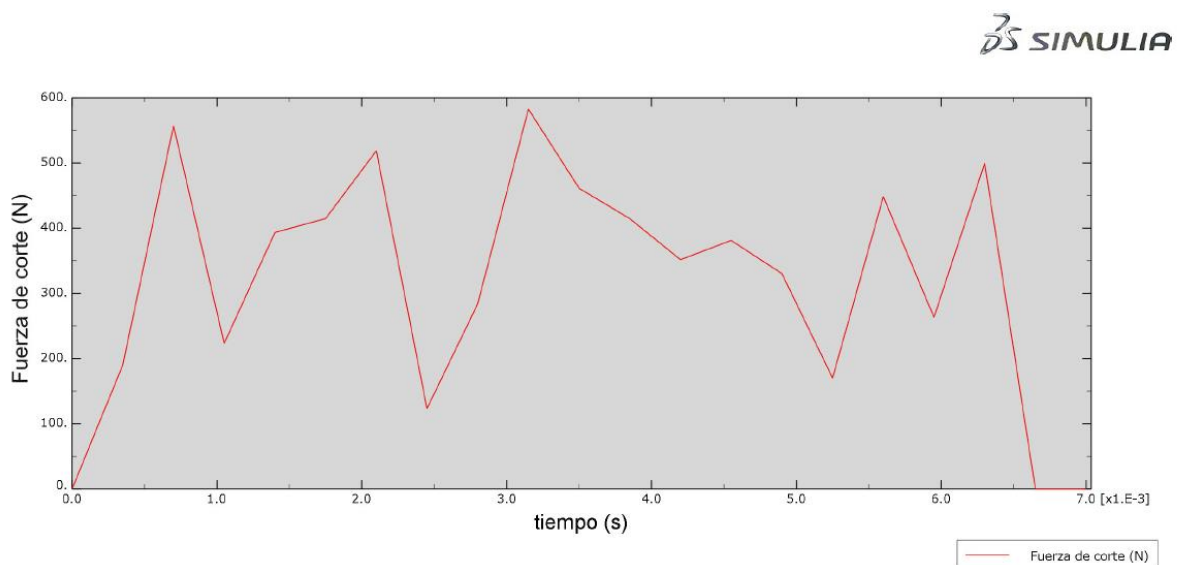


Figura 7.13.-Fuerza de corte del ensayo 7. Abaqus.

La representación de los distintos métodos empleados se muestra en la figura 7.14.

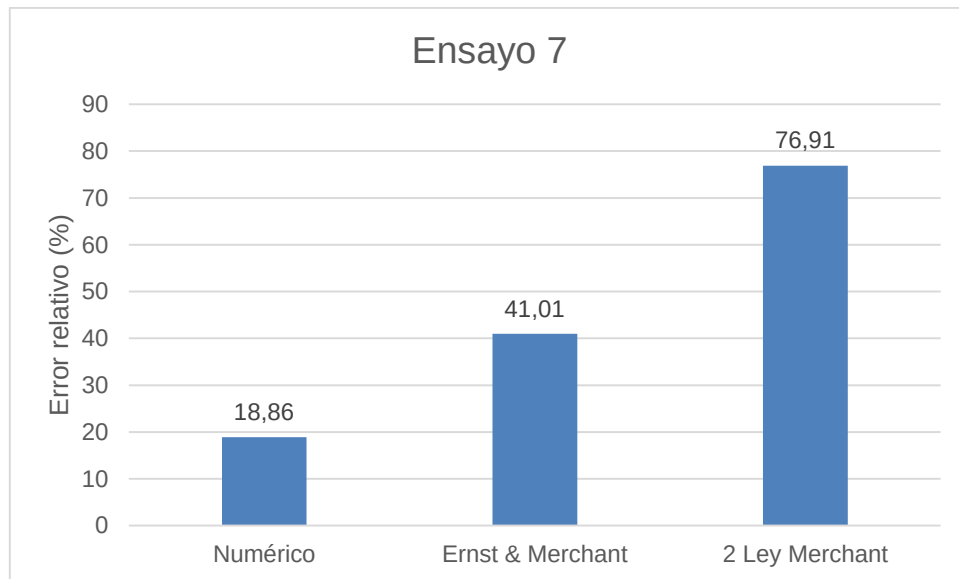


Figura 7.14.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 7.

El valor de la fuerza de corte en el método numérico es superior que el experimental. Los valores analíticos no se acercan al valor experimental por lo que podemos obviar los valores analíticos.

7.8. Ensayo 8.

Las condiciones de corte en este ensayo son las mismas que en el ensayo 4 con la excepción de la profundidad de pasada que ahora vale 2 mm.

En la tabla 6.1 se muestran los valores obtenidos analíticamente. Los valores de fuerzas de corte en Abaqus CAE se muestran en la figura 7.15.

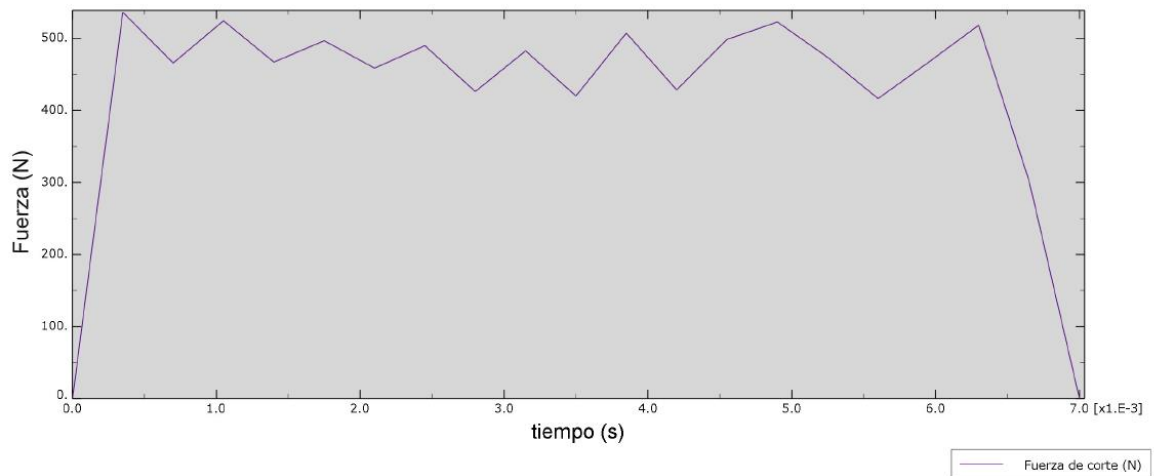


Figura 7.15.-Fuerza de corte del ensayo 8. Abaqus.

La representación de los distintos métodos empleados se muestra en la figura 7.16.

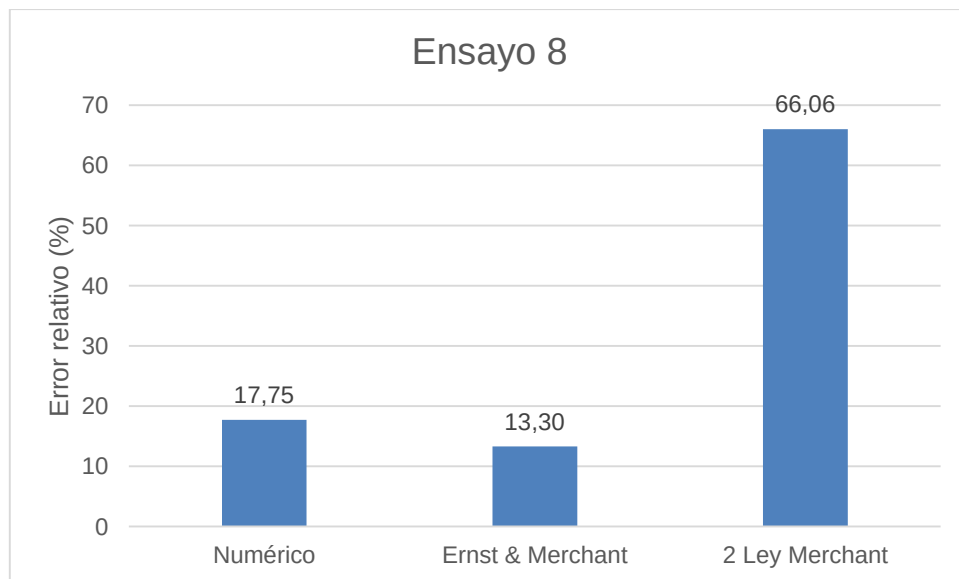


Figura 7.16.-Comparación de la fuerza de corte. Ensayo 8.

Al igual que el ensayo 6, el valor numérico es ligeramente superior al valor experimental, mientras que la teoría de Ernst y Merchant se acerca al valor experimental donde es influyente la profundidad de pasada.

7.9. Influencia de los parámetros de corte.

Se va a proceder a analizar la influencia de las variables que afectan a un proceso y para la influencia de un factor en un respuesta se ha hecho un gráfico de efectos principales, donde se ha analizado la influencia del avance, la profundidad y la velocidad de corte en respuesta al error relativo respecto al método experimental. Para ello, se ha mantenido constantes dos parámetros y al variar la otra se ha representado la fuerza de corte para distintos parámetros de ese factor.

7.9.1. Método analítico.

7.9.1.1. Ernst y Merchant.

En la figura 7.17 se observa la influencia de la profundidad de pasada en la que el error relativo disminuye al aumentar la profundidad de pasada.

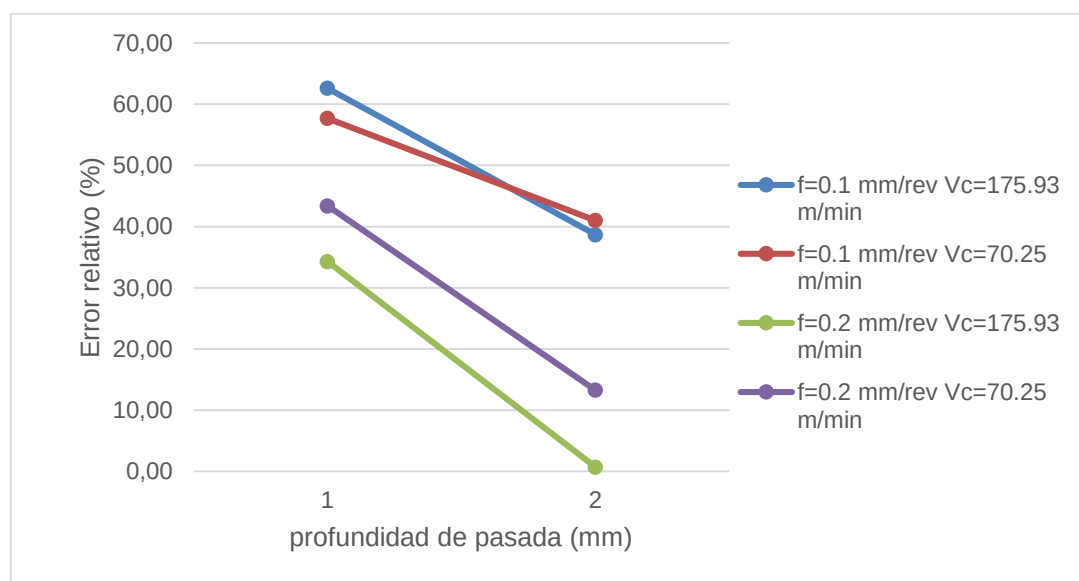


Figura 7.17.- Influencia de la profundidad de pasada. Método E&M.

En la figura 7.18 se muestra el error relativo en función del avance. A mayor avance menor es el error cometido.

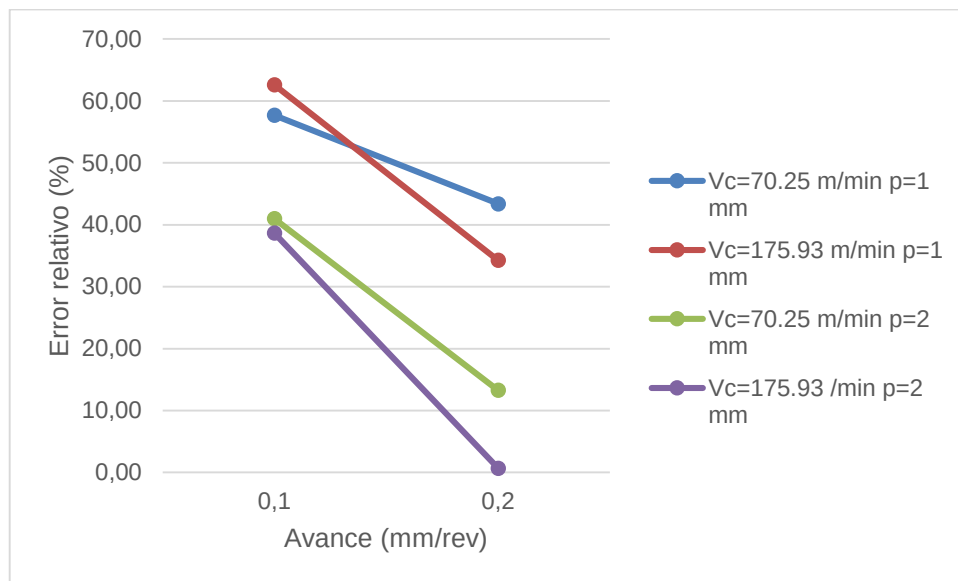


Tabla 7.18.-Influencia del avance. Método E&M.

Por último en la tabla 7.19 representamos el error en función de la velocidad de corte, donde en unos casos aumenta, para ello la velocidad de corte debería disminuir, disminuyendo el error.

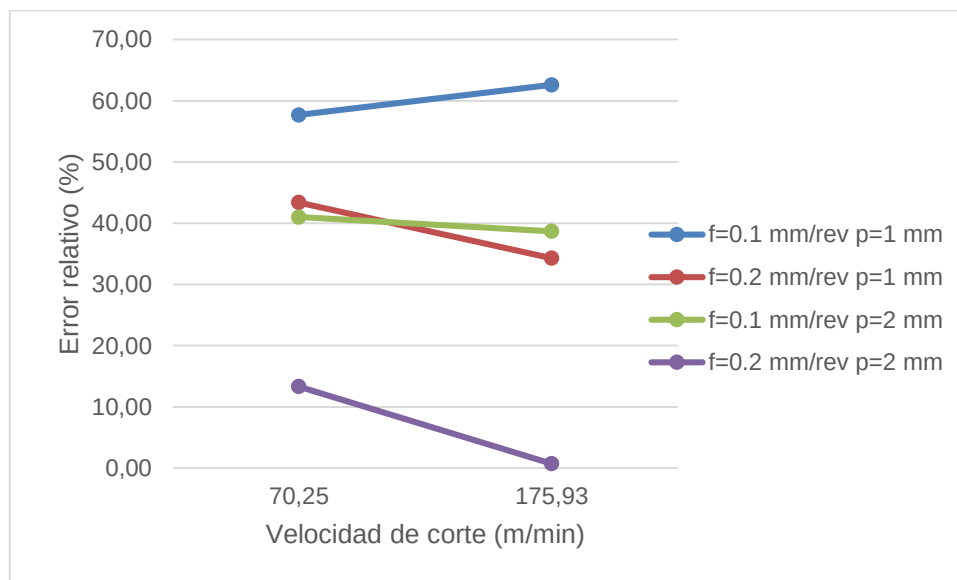


Tabla 7.19.- Influencia de la velocidad de corte. Método E&M.

7.9.1.2 Ley de Merchant.

En la figura 7.20 se observa la influencia de la profundidad de pasada en el que el error relativo disminuye al aumentar la profundidad de pasada, como ocurre en el método de Ernst & Merchant.

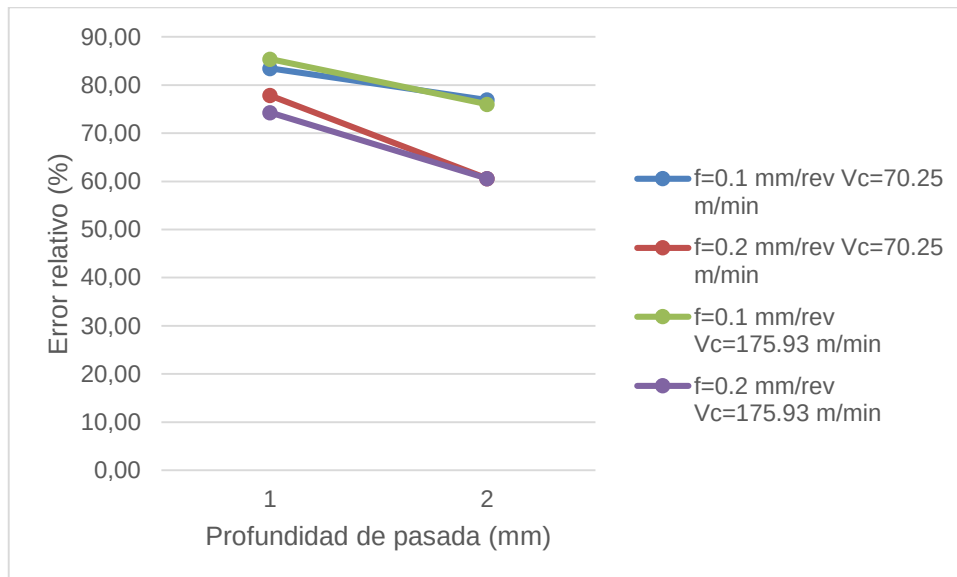


Figura 7.20.- Influencia de la profundidad de pasada. Método 2 Ley Merchant.

En la figura 7.21 se muestra el error en función del avance y como el caso anterior el error disminuye al aumentar el avance.

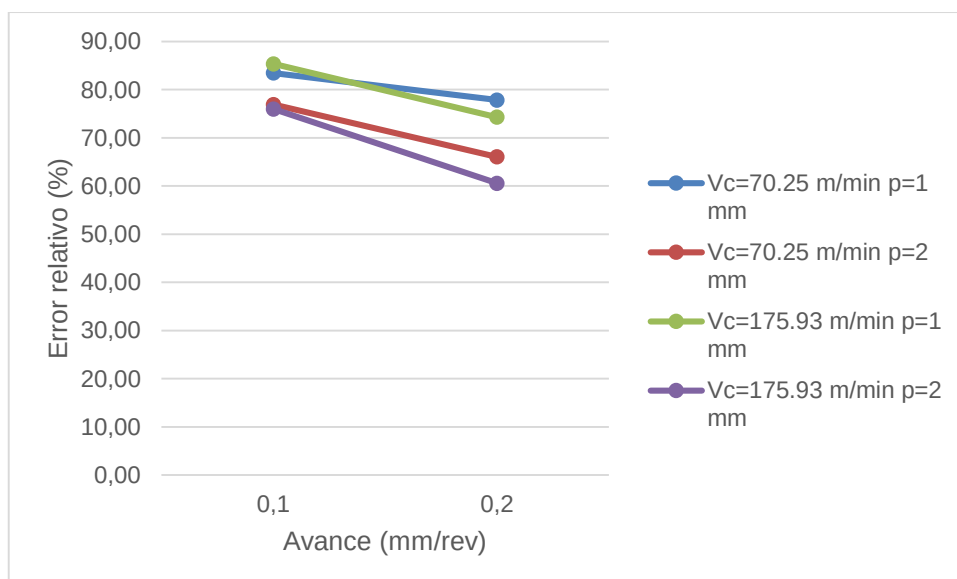


Figura 7.21.- Influencia del avance. Método 2 Ley Merchant.

Por último en la tabla 7.22 representamos el error en función de la velocidad de corte, tendiendo a aumentar el error para unos factores y disminuyendo para otros, como ocurre en el caso anterior (Figura 7.19).

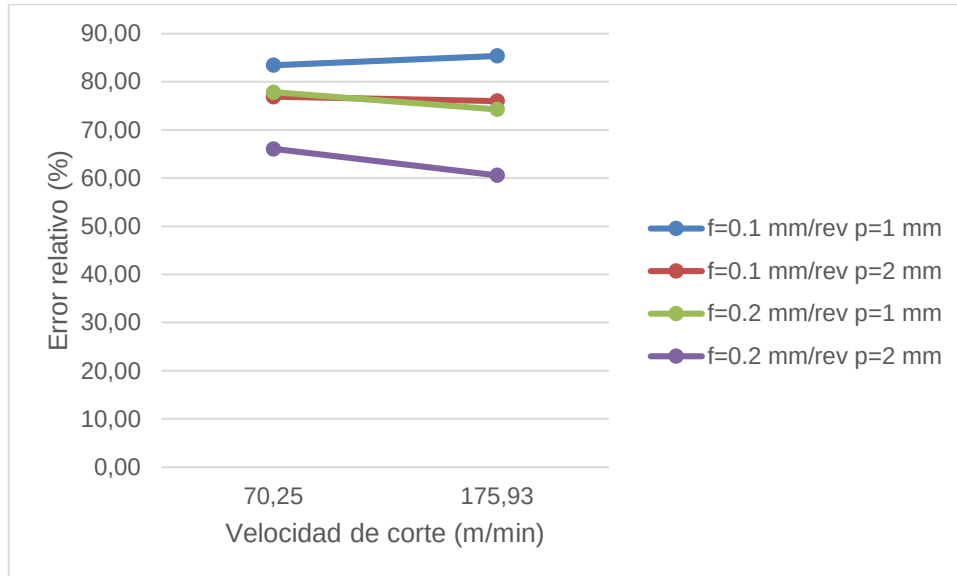


Figura 7.22.- Influencia de la velocidad. Método 2 Ley Merchant.

7.9.2. Método numérico.

En la figura 7.23 se muestra el error relativo en función de la profundidad de pasada para avances y velocidades de corte constantes. Al aumentar la profundidad de pasada, aumenta el error relativo, tal y como habíamos deducido en las gráficas de columnas para los ensayos donde la profundidad de pasada es de 2 mm.

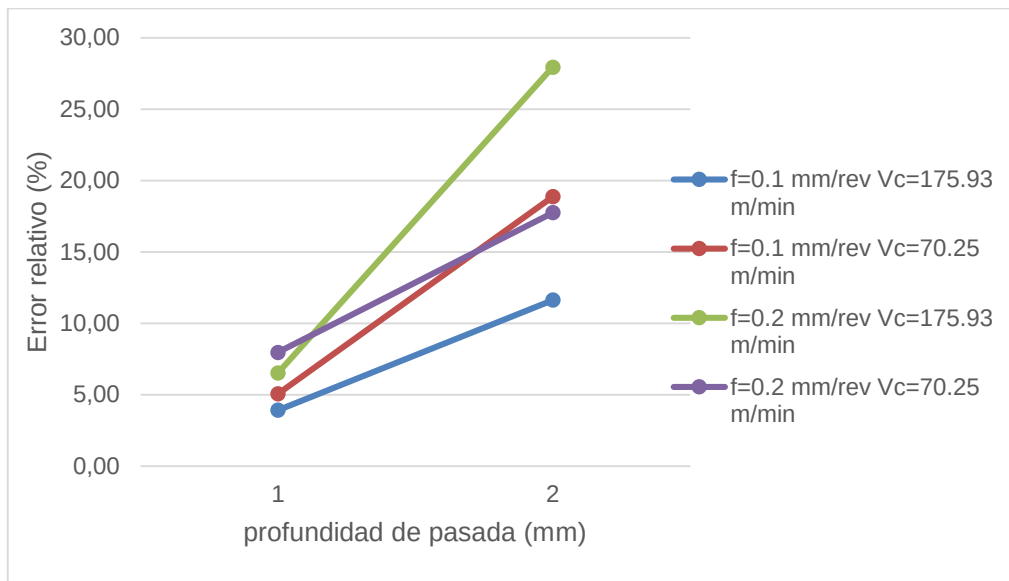


Figura 7.23.- Influencia de la profundidad de pasada. Método numérico.

La influencia del avance se muestra en la Figura 7.24, aumentando para la mayoría de los casos el error al aumentar el avance, afectando la profundidad en esta tendencia.

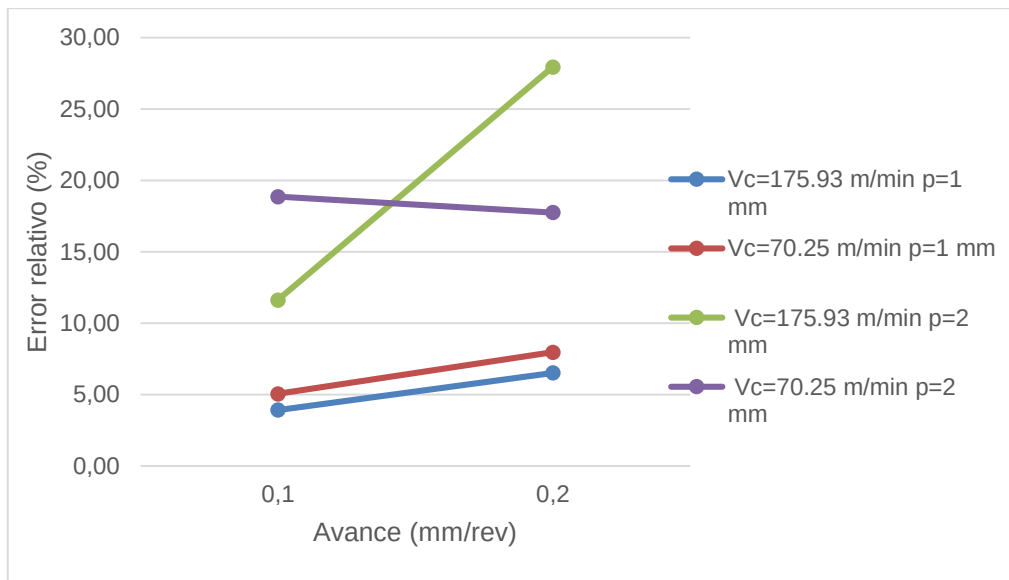


Figura 7.24.- Influencia del avance. Método numérico.

La Figura 7.25 muestra el error relativo en función de la velocidad de corte, aumenta el error al aumentar la velocidad de corte en un caso. Para solucionarlo, se tendría que aumentar el paso de tiempo en Abaqus o aumentando para ese caso el número de elementos en el mallado.

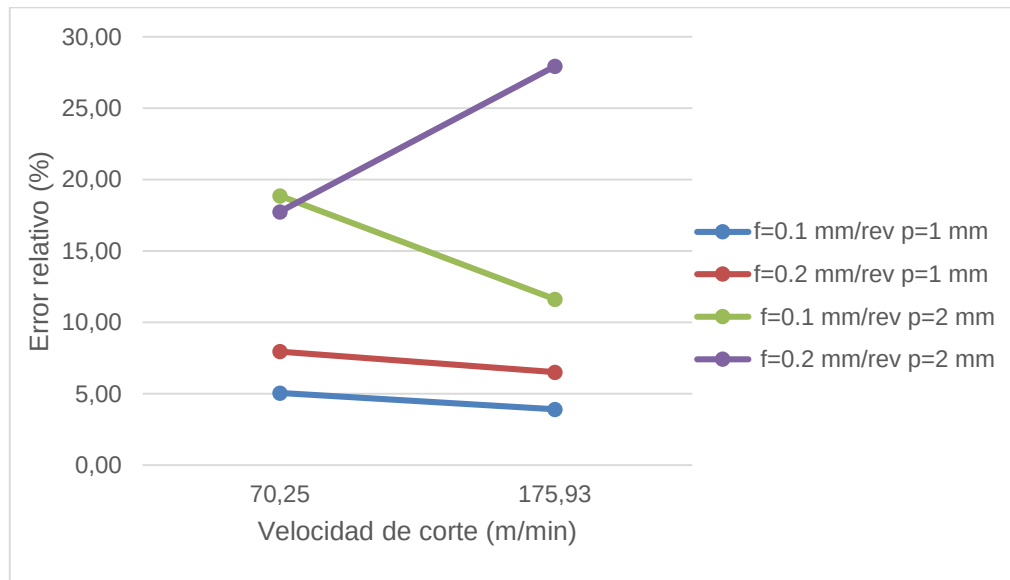


Figura 7.25.- Influencia de la velocidad de corte. Método numérico.

8. CONCLUSIÓN

- Se ha hecho una introducción de la tecnología del mecanizado, de los distintos procesos de arranque de viruta, centrandonos en el torneado, objeto del trabajo. Además hemos mencionado distintos modelos de corte y se ha profundizado en simplificaciones como el modelo de corte ortogonal y teorías analíticas para el cálculo de las fuerzas de corte, así como distintos parámetros que influyen en el corte ortogonal. Se ha calculado la fuerza de corte en 8 ensayos con condiciones de corte diferentes.

- Se ha hecho una pequeña introducción del método de elementos finitos. Se ha implementado el modelo numérico en Abaqus 6.13-1; se ha explicado los distintos pasos de la simulación y los parámetros que se han tenido en cuenta para la resolución del problema. Se ha simulado 8 ensayos con diferentes condiciones y parámetros para la obtención numérica de la fuerza de corte. Han sido claves la Ley constitutiva de Hollomon, el criterio de daño del material y el mallado. Pues para analizar el grado de endurecimiento del material hemos utilizado la Ley de Hollomon, por su sencillez, cogiendo datos experimentales de n y k . Sujeto a futuros trabajos el uso de otras leyes constitutivas y criterios de daño del material. El mallado óptimo en estos casos es un mallado adaptativo o acoplado (ALE), para analizar la deformación de la herramienta durante el corte, pero en el trabajo hemos analizado el proceso con una herramienta analítica rígida como supone el modelo de corte ortogonal no pudiendo utilizar este tipo de mallado. Pues se ha llegado a la conclusión que para utilizar este mallado es necesario utilizar una herramienta deformable que se pueda mallar y se deforme en el contacto con la pieza de trabajo.

- Se han medido experimentalmente las fuerzas de corte para cada uno de los 8 ensayos. Se ha comparado los valores de las fuerzas de corte entre el modelo ortogonal, numérico y experimental. Se ha comprobado que para los ensayos en los que la profundidad de pasada es 1 mm el error relativo cometido con respecto a los valores experimentales oscila entre 3 y 8 %. Los valores analíticos dan un valor de fuerza de corte muy inferior al valor experimental, por lo que el error relativo es muy grande. Además el valor de las fuerzas de corte numéricas en los ensayos 5,6,7 y 8 son superiores a las fuerzas experimentales, teniendo un error relativo más alto. Esto

se debe a que el modelo 2D de corte ortogonal en Abaqus no responde con buenos resultados a profundidad de pasada de 2 mm.

- Por último se ha hecho un estudio en el que se analiza la influencia de las variables que afectan a un proceso. Se ha hecho un gráfico de efectos principales con el error relativo a la fuerza experimental como respuesta. Numéricamente se ha verificado que al aumentar la profundidad de pasada, el error aumenta considerablemente, justificando que Abaqus 6.13-1 no reproduce con veracidad esta condición de corte. Analíticamente, ha ocurrido lo contrario, al aumentar la profundidad de pasada, disminuye el error.

- Para predecir el acabado de la superficie de los diferentes ensayos, habría que simular en Abaqus 6.13-1 un modelo de corte 3D, en el que la coordenada z dictará el acabado superficial de las piezas, y podrían obtenerse resultados veraces para profundidades de pasada mayores de un 1 mm. Sujeto a futuros estudios.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Groover, MP. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. Tercera edición.
- Kalpakjian, S. Schmid, R (2002). *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. Cuarta edición.
- Kalpakjian, S. Schmid, R (2008). *Manufacturing, Engineering and Technology*. Quinta edición.
- Torres, I. (2011). Proyecto Fin de Carrera. *Desarrollo y análisis de un modelo numérico para el estudio de elementos tubulares sometidos a impacto*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Rodriguez, JL. (2013). Proyecto Fin de Carrera. *Análisis numérico de procesos de corte ortogonal y validación experimental de resultados*. Universidad de Jaén.
- AMAE (2011). *Finite Element Simulation and Experiment of Chip Formation Process during High Speed Machining of AISI 1045 Hardened Steel*. Volume 2.
- Eskandari, M. Bahman, M. Mostafa, M. / International Journal of Engineering Research and Applications IJERA (2013). *Prediction Tensile Stress of AA6063 Using Particle Swarm Optimization Algorithm*. Volume 3.
- Forn, A. Rupérez, E. Martín, E y Picas, J.A. (2007). *Deformación plástica del material AA6063*. Volume 1.
- Abaqus CAE 6.13-1 (2013). *Abaqus Analysis User's Manual*.
- Jiménez, JI (2014). *Ingeniería del Mecanizado*. Universidad de Jaén.
- Dorado, R (2014). *Tecnologías Aplicadas a la Fabricación*. Universidad de Jaén.
- Felippa, C (2015). *Introduction to Finite Element Methods ASEN*. University of Colorado at Boulder.
- ERASTEEL, 2010. *Aceros Rápidos HSS*. (<http://www.erasteel.com/es/content/aceros-rapidos-hss>).
- Sears, Z (2009). *Física Universitaria*. Volumen 1. (<https://gamorenorod.files.wordpress.com/2011/06/fisica-universitaria-sears-zemansky-12ava-edicion-vol1.pdf>).
- Matweb, 2016. *Material Property Data*. (<http://www.matweb.com>).
- Norma UNE 15411. *Terminología de las máquinas herramientas. Tornos de cilindrar y roscar*.

PN Rao (2013). *Manufacturing Technology: Metal Cutting and Machine Tools*.
Tercera edición.