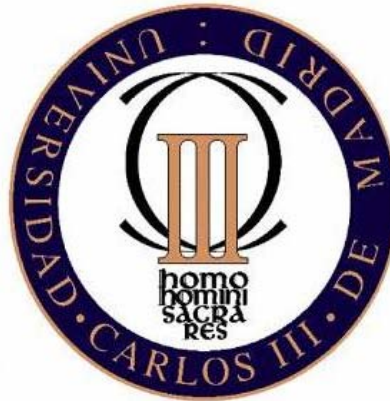


UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**MODELIZACIÓN NUMÉRICA DE LOS FENÓMENOS EN CORTE  
ORTOGONAL DEL  $Ti_6Al_4V$**

**PROYECTO FIN DE CARRERA  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA**

Autor: Marta María Moure Cuadrado

Tutor: Xavier Soldani

Leganés, Octubre 2010



## **RESUMEN**

La idea de realizar el siguiente proyecto surge con el fin de estudiar el comportamiento de las aleaciones de Titanio frente a fenómenos de corte ortogonal a altas velocidades de corte, ya que hoy en día es muy usado tanto en aplicaciones biomédicas como industriales.

Este trabajo se centra en la modelización numérica de corte ortogonal de una aleación termo-resistente como es el Titanio. Los modelos numéricos utilizados han sido desarrollados usando el código comercial ABAQUS / *Explicit*, basados en una formulación Lagrangiana, y que han permitido reproducir el fenómeno de localización de las bandas adiabáticas de cizalladura, asociadas al mecanizado de aleaciones de mala maquinabilidad como el Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V o Inconel. Para ello se ha utilizado la ley de Jhonson-Cook's, la cual definiremos más adelante.

Los factores en los que nos hemos centrado, para posteriormente poder compararlos con resultados experimentales obtenidos de la literatura, son: La segmentación de la viruta, la frecuencia de segmentación, el ancho de banda, las fuerzas de corte y de avance, la morfología de viruta y en algunos casos el ángulo de cizallado. Comprobaremos que todos estos factores van a estar influenciados con la velocidad de corte, la fricción entre la herramienta y la pieza y el tipo de malla utilizada.

Se han obtenido conclusiones interesantes que ayudarán a simplificar y reducir el coste de futuros ensayos y experimentos. Además, se proponen posibles trabajos futuros que ayudarán a complementar este y trabajos anteriores, que traten sobre el mismo tema de investigación.

**Palabras clave:** aleaciones termo-resistentes, modelización numérica, corte ortogonal y segmentación de viruta.



## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
<b><u>Capítulo I</u></b>	
1.- INTRODUCCIÓN.....	9
1.1.- MOTIVACIÓN.....	9
1.2.- OBJETIVOS.....	11
1.3.- FASES DE DESARROLLO.....	11
1.4.- MEDIOS EMPLEADOS.....	12
1.5.- ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.....	12
<b><u>Capítulo II</u></b>	
2.- ESTADO DEL ARTE.....	14
2.1.- ALEACIONES DE TITANIO.....	14
2.1.1.- Generalidades del Titanio.....	14
2.1.2.- Clasificación de las aleaciones de Titanio.....	15
2.1.3.- Aleación de Titanio $Ti_6Al_4V$ .....	16
2.1.4.- Aplicaciones de las aleaciones de Titanio.....	18
2.2.- MECANIZADO.....	22
2.2.1.- Mecanizado como proceso de fabricación.....	22
2.2.2.- Definición de mecanizado.....	23
2.2.3.- Generalidades del mecanizado.....	26
A.- Movimientos para el arranque de viruta en el mecanizado.....	26
B.- Parámetros fundamentales en el corte.....	27
C.- Mecanismo de formación de la viruta.....	28
D.- Morfología de la viruta.....	30
E.- Efectos de la velocidad de corte sobre la morfología de la viruta y sobre las fuerzas de corte.....	33
2.2.4.- Corte ortogonal.....	35
A.- Ángulos en el corte ortogonal.....	36
B.- Velocidades en el corte ortogonal.....	37
C.- Fuerzas en el corte ortogonal.....	38
2.2.5.- Mecanizado de las aleaciones de titanio [15].....	40



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

2.2.5.1.- Dificultad del mecanizado de la aleación $Ti_6Al_4V$ .....	40
2.2.5.2.- Estudio de la segmentación del titanio .....	41
2.3.- ELEMENTOS FINITOS .....	43
<b><u>Capítulo III</u></b>	
3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	46
3.1.- CORTE ORTOGONAL EXPERIMENTAL DEL $Ti_6Al_4V$ .....	46
- PRESIONES ESPECÍFICAS DE CORTE Y AVANCE EXPERIMENTALES.....	47
- FRECUENCIA DE SEGMENTACIÓN DE VIRUTA EXPERIMENTAL.....	52
- ANCHO DE BANDA EXPERIMENTAL .....	53
- ÁNGULO DE CIZALLADO EXPERIMENTAL .....	54
<b><u>Capítulo IV</u></b>	
4.- MODELO NUMÉRICO .....	55
4.1.- CARACTERÍSTICAS DEL MODELO .....	55
a) MALLADO DEL MODELO .....	55
b) ÁNGULOS DE LA HERRAMIENTA Y GEOMETRÍA DEL CORTE.....	58
c) PARÁMETROS DE CORTE .....	58
4.2.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA DEL MATERIAL .....	60
4.3.- DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES Y PARÁMETROS A ANALIZAR .....	61
<b><u>Capítulo V</u></b>	
5.- VALIDACIÓN Y RESULTADOS .....	63
5.1.- VALIDACIÓN .....	63
5.2.-RESULTADOS.....	66
5.2.1.- Estudio de las fuerzas de corte y de las fuerzas de avance .....	66
5.2.2.- Estudio de la frecuencia de segmentación.....	75
5.2.3.- Estudio del ancho de banda de cizalladura.....	80
5.2.4.- Estudio del ángulo de cizallado .....	84
5.2.5.- Estudio de la morfología de la viruta.....	89
<b><u>Capítulo VI</u></b>	
6.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	94
6.1.- CONCLUSIONES .....	94
6.2.- TRABAJOS FUTUROS .....	97
<b>PRESUPUESTO</b> .....	99
<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	101



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Aleaciones de Titanio utilizadas en el Boeing 787 [1].....	10
Figura 1.2.- Diagrama esquemático de la formación de la viruta segmentada [2] .	10
Figura 2.1.- Implante dental de titanio [6] y [7].....	19
Figura 2.2.- Conjunto de prótesis de cadera de titanio[8] y prótesis de rodilla de titanio [9].....	19
Figura 2.3.- Ejemplos de aplicaciones del titanio en la industria aeroespacial [10] y [11].....	20
Figura 2.4.- Ejemplos de aplicaciones deportivas: raqueta con el marco de titanio [12] y bicicleta de titanio [13].....	21
Figura 2.5.- Proceso de fabricación .....	22
Figura 2.6.- a) Filos geoméricamente sin determinar; b) Filos geoméricamente determinados [14].....	23
Figura 2.7.- Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación $i$ [11].....	24
Figura 2.8.- Discretización de una herramienta como la suma de filos de corte rectos. ....	24
Figura 2.9.- Complejidad geométrica del corte oblicuo. Derecha: descomposición de las fuerzas en un plano perpendicular al filo [11].....	25
Figura 2.10.- Velocidad de corte en torneado y fresado[17].....	27
Figura 2.11.- Zonas principales de generación de calor .....	29
Figura 2.12.- Proceso de arranque de viruta en el mecanizado [12].....	30
Figura 2.13.- Diferentes tipos de viruta en el mecanizado [12].....	32
Figura 2.14.- Ángulos en el corte ortogonal [18] .....	35
Figura 2.15.- Velocidades en el punto ortogonal [18] .....	38
Figura 2.16.- Fuerzas en el corte ortogonal [18].....	39
Figura 2.17- Diagrama esquemático de la formación de la viruta segmentada [2] .	42
Figura 2.18.- Formación de viruta segmentada para la aleación $Ti_6Al_4V$ : 1 plano de cizalladura, 2 segmentación, 3 formación de la viruta [15].....	42
Figura 2.19.- Ejemplos de aplicación de MEF en ABAQUS/Explicit [19] y [20] ....	45
Figura 3.1.- Comparación de las presiones específicas de corte experimentales obtenidas en diversos estudios para diversas velocidades de corte .....	48



*Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

*Figura 3.2.- Comparación de las presiones específicas de corte experimentales obtenidas en diversos estudios para diversas velocidades de corte ..... 48*

*Figura 3.3.- Comparación de las frecuencia de segmentación vs velocidad de corte de los experimentos realizados por Molinari et al. [26] y Cotterell y Byrne [22]... 53*

*Figura 3.4.- Ancho de banda en función de la velocidad de corte para la aleación de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V del estudio realizado por Molinari et al. [26]..... 53*

*Figura 3.5.- Ángulo de cizallado obtenido por Gente y Hoffmeister (2001) [2]..... 54*

*Figura 4.1.- Esquema del modelo numérico..... 56*

*Figura 4.2.- Contorno de tensiones obtenidas durante la formación de viruta segmentada ..... 57*

*Figura 4.3.- Ángulos y geometría del proceso ..... 58*

*Figura 5.1.- Presiones específicas de corte experimentales y numéricas..... 64*

*Figura 5.2.- Presiones específicas de avance experimentales y numéricas..... 65*

*Figura 5.3.- Método de obtención de las fuerzas de corte y avance para a) bajas velocidades y b) altas velocidades ..... 67*

*Figura 5.4 .- Fuerzas de corte y de avance para la malla 2 μm y μ = 0,4..... 68*

*Figura 5.5.- Representación de las fuerzas de corte y avance obtenidas para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con respecto a la velocidad de corte y para μ = 0,1 y μ = 0,4..... 70*

*Figura 5.6.- Fuerzas de corte obtenidas numéricamente para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con respecto a la velocidad de corte para la malla de 2 μm ..... 71*

*Figura 5.7.- Fuerzas de avance obtenidas numéricamente para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con respecto a la velocidad de corte para la malla de 2 μm..... 72*

*Figura 5.8.- Representación de la frecuencia de segmentación para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con relación a la velocidad de corte..... 76*

*Figura 5.9.- Comparación entre la frecuencia de segmentación numérica y la experimental de Molinari et al [26] y Cotterell y Byrne [22]..... 78*

*Figura 5.10.- Comparación de la frecuencia de segmentación entre el Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V y el Inconel 718 [30]..... 79*

*Figura 5.11.- Detalle del "Path" generado en ABAQUS para el cálculo del ancho de banda de cizalladura ..... 80*

*Figura 5.12.- Deformación plástica en función de la longitud del "Path" ..... 81*

*Figura 5.13.- Ancho de banda de cizallado numérico y experimental de Molinari et al. para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con relación a la velocidad de corte ..... 82*



*Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

*Figura 5.14.- Metodología seguida para calcular en ángulo de cizallado..... 84*

*Figura 5.15.- Representación de los resultados numéricos del ángulo de cizallado para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con relación a la velocidad de corte ..... 86*

*Figura 5.16.- Comparación del ángulo de cizallado obtenido numéricamente y el obtenido experimentalmente por Gente y Hoffmeister (2001)..... 88*

*Figura 5.17.- Segmentación de la viruta para la simulación con malla 2 μm y fricción μ = 0,1 ..... 90*

*Figura 5.18.- Influencia de la fricción sobre la morfología de viruta..... 92*

*Figura 5.19.- Relación entre las fuerzas de corte y avance y la morfología de viruta. a) fuerzas correspondientes para una viruta continua y b) fuerzas correspondientes para una viruta segmentada ..... 93*

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1.- Composición del <math>Ti_6Al_4V</math> [3]</i> .....	17
<i>Tabla 2.2.- Propiedades físicas del <math>Ti_6Al_4V</math> [4]</i> .....	17
<i>Tabla 4.1.- Propiedades del material y de la herramienta</i> .....	59
<i>Tabla 4.2.- Parámetros de la ecuación constitutiva para el <math>Ti_6Al_4V</math></i> .....	61
<i>Tabla 5.1.- Resultados de las fuerzas de corte obtenidos numéricamente para la aleación <math>Ti_6Al_4V</math></i> .....	69
<i>Tabla 5.2.- Resultados de las fuerzas de avance obtenidos numéricamente para la aleación <math>Ti_6Al_4V</math></i> .....	69
<i>Tabla 5.3.- Coeficientes de fricción de salida obtenidos para nuestro modelo</i> .....	74
<i>Tabla 5.4.- Frecuencias de corte obtenidas numéricamente para la aleación <math>Ti_6Al_4V</math></i> .....	76
<i>Tabla 5.5.- Anchos de banda obtenidos numéricamente para la aleación <math>Ti_6Al_4V</math></i> ...	82
<i>Tabla 5.6.- Resultados del ángulo de cizallado obtenidos numéricamente para la aleación <math>Ti_6Al_4V</math></i> .....	85





# **Capítulo I**

## **1.- INTRODUCCIÓN.**

En este primer capítulo introductorio se va a proceder a explicar cuáles son los motivos que nos han llevado a realizar este proyecto, los objetivos que se pretenden conseguir, las fases de desarrollo que se han llevado a cabo, los medios empleados y la estructura de la memoria.

### **1.1.- MOTIVACIÓN.**

En los últimos años, el uso de las aleaciones de Titanio, en especial la aleación de composición  $Ti_6Al_4V$ , ha ido en aumento, como puede ser en aplicaciones biomédicas, en la industria automovilística, en la industria aeronáutica y espacial, y en la construcción naval entre otras; y todo indica que este crecimiento continuará en el futuro, sobre todo debido a su necesidad en intervenciones quirúrgicas y aplicaciones aeroespaciales. Todos los estudios realizados hasta la fecha muestran que la biocompatibilidad del titanio es excelente; esta propiedad unida a su elevada resistencia mecánica, a su bajo módulo de elasticidad y a su resistencia a la corrosión, lo convierten en un metal excelente para su uso en prótesis articulares, implantes dentales y en otras aplicaciones en medicina.

Este crecimiento es debido a que el Titanio reemplaza a otros materiales como pueden ser los aceros inoxidables o el aluminio, ya que es altamente resistente y tratable con calor (en especial para aplicaciones aeroespaciales), para utilizarse con temperaturas de hasta  $400^{\circ}C$  que ofrece una excelente resistencia, dureza y ductilidad junto con una buena soldabilidad y fabricabilidad.

A continuación mostramos, como curiosidad, una figura en la que se pueden observar las partes de un avión que están hechas de titanio y en qué porcentaje se encuentran con relación al resto de materiales que lo forman. Como se puede observar

se utiliza para construir forjados estructurales de los aviones, discos de ventilación, álabes y palas de turbinas, ya que estas soportan altísimas temperaturas (*figura 1.1*).

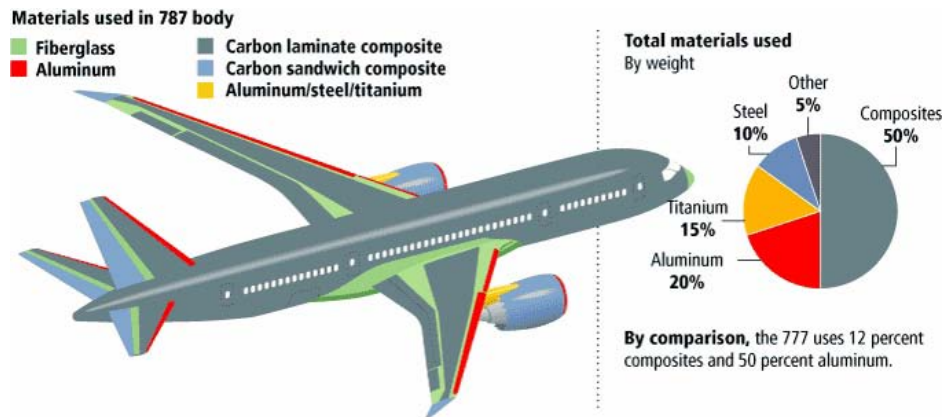


Figura 1.1.- Aleaciones de Titanio utilizadas en el Boeing 787 [1].

Aunque el titanio posee grandes ventajas, también posee grandes inconvenientes a la hora de mecanizarlos, y sobre todo si hablamos del mecanizado ortogonal a alta velocidad. Al ser un material que posee una mala conductividad térmica y por tanto difícil de refrigerar, puede deteriorar el filo de corte de las herramientas a consecuencia de las altas temperaturas que se alcanzan en la zona de corte.

También es sabido que las aleaciones de titanio se consideran como materiales de difícil maquinabilidad, ya que su mecanizado implica fuerzas de corte ligeramente superiores a las necesarias en el mecanizado de aceros. Pese a sus problemas, posee una característica muy importante, que es la tendencia a generar viruta segmentada, como se aprecia en la *figura 1.2*. Las bandas de deformación aparecen en las virutas incluso a velocidades de corte muy bajas y están relacionadas con la baja difusividad que presenta este material.

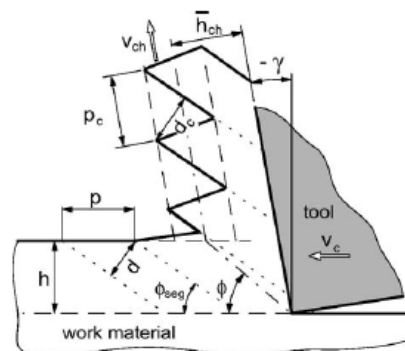


Figura 1.2.- Formación de la viruta segmentada [2].



Por todo ello, en el presente proyecto se va a proceder a analizar cuál es el comportamiento de las aleaciones de titanio en corte ortogonal a altas velocidades, en lo que se refiere a la forma de la viruta, sus fuerzas de corte, la frecuencia de aparición de las bandas de cizalladura, el ancho de banda y el ángulo de cizallado, utilizando para ello un programa de elementos finitos como es ABAQUS / *Explicit*.

## **1.2.- OBJETIVOS.**

El **objetivo principal** de este proyecto es analizar si el modelo utilizado es válido para simular el comportamiento de la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V en el proceso de mecanizado a alta velocidad en corte ortogonal, mediante la herramienta de elementos finitos ABAQUS / *Explicit*. Para dicha validación se han comparado los resultados obtenidos con los experimentales de la literatura.

También se pretende estudiar cual es el efecto de las variables independientes (velocidad de corte, coeficiente de fricción y tipo de malla utilizada), sobre distintas variables dependientes (fuerza de corte, fuerza de avance, ancho de banda de cizalladura, frecuencia de aparición de las bandas, ángulo de cizallado y morfología generada).

Como **objetivo secundario** se pretende comparar los resultados obtenidos para el Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con los resultados obtenidos para el INCONEL (estudio realizado anteriormente a este proyecto), ya que ambos son materiales de características similares.

La realización de estas simulaciones será de gran utilidad en futuros estudios, ya que reducirá tanto tiempo de cálculo a emplear como los costes ocasionados.

## **1.3.- FASES DE DESARROLLO.**

Para la realización de todas las simulaciones se ha utilizado un modelo numérico generado en el programa ABAQUS / *Explicit*. En dicho modelo hemos mantenido algunos de los parámetros fijos como pueden ser el módulo de elasticidad, la resistencia del material y algunos de los parámetros de corte, mientras que hemos ido modificando



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

otros de los parámetros con el fin de analizar su influencia en el proceso de mecanizado, como son la velocidad de corte, el tamaño de la malla y la fricción entre la herramienta y la pieza.

Posteriormente se ha procedido a comparar los resultados obtenidos con los experimentales de la bibliografía, para ello se han utilizado los mismos parámetros que en la literatura.

Por último, una vez realizadas las simulaciones, se obtienen como resultados: la morfología de la viruta, la fuerza de corte, la fuerza de avance, el ancho de banda, la frecuencia de aparición de la banda de cizallado y el ángulo de cizallado. Posteriormente se estudia qué relación existe entre los resultados obtenidos y los parámetros que se han ido modificando. Y se realizará una comparación entre los resultados obtenidos para nuestra aleación de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V con los resultados obtenidos en otros estudios para el Inconel 718.

### **1.4.- MEDIOS EMPLEADOS.**

Para realizar las simulaciones se ha utilizado el programa comercial ABAQUS / *Explicit*, que es un programa de simulación que utiliza el método de elementos finitos.

Los métodos de elementos finitos son muy utilizados actualmente ya que simplifican los tiempos de ensayo y sus costes, permitiendo así que se puedan realizar cálculos complejos en menor tiempo y de forma más sencilla, reduciendo así la construcción de prototipos que tienen que ser corregidos de forma iterativa.

Además es importante recordar que el modelo numérico definido es lagrangiano, en el cual la malla se mueve solidariamente con el material.

### **1.5.- ESTRUCTURA DE LA MEMORIA.**

A continuación procedemos a hacer un breve resumen de la estructura de la memoria. Esta consta de los siguientes capítulos:



**Capítulo 2.- Estado del arte:** este capítulo se centra en el estudio teórico de la tecnologías sobre las que se centra el trabajo, se va a hablar sobre las aleaciones de titanio, sus propiedades, sus características y sus aplicaciones, el mecanizado como concepto general, el mecanizado con corte ortogonal como caso particular y las dificultades que presentan las aleaciones de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V al mecanizado. En último lugar se hablará sobre los métodos de elementos finitos.

**Capítulo 3.- Estudio experimental:** en este capítulo nos centramos en recopilar la información de los principales estudios publicados a cerca del mecanizado ortogonal del titanio. El objetivo es conocer qué se ha estudiado anteriormente al proyecto presente y recopilar datos experimentales para posteriormente comparar con los resultados obtenidos del modelo propuesto y así proceder a su validación.

**Capítulo 4.- Modelo numérico:** en este capítulo vamos realizar una introducción al método de los elementos finitos (MEF), que es el que se ha utilizado para la realización de la simulaciones, utilizando unos parámetros fijos para todas las simulaciones y variando otros parámetros para cada simulación. También se van a mencionar cuales son las características de nuestro modelo y cuál es la ecuación constitutiva del material que hemos utilizado. Por último se mencionarán cuales son los parámetros que se han analizado para realizar el presente proyecto.

**Capítulo 5.- Validación y resultados:** en este último capítulo es donde vamos a mostrar todos los resultados obtenidos y los vamos a comparar con los de la literatura para proceder a la validación de nuestro modelo. También se analizarán los resultados obtenidos en profundidad para ver qué influencia tienen unos sobre otros y se realizará una comparación entre la aleación de titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V y el Inconel 718.



## **Capítulo II**

### **2.- ESTADO DEL ARTE.**

En este segundo capítulo se va a realizar una introducción teórica sobre los conceptos generales que deben conocerse para realizar y poder entender este proyecto.

A su vez vamos a dividir este capítulo en tres partes claramente diferenciadas: las aleaciones de titanio, el mecanizado y los elementos finitos. En el primer punto, definiremos qué son las aleaciones de titanio, sus propiedades, sus características y algunas de sus aplicaciones más importantes. En el segundo punto, definiremos el concepto de mecanizado como un concepto general y analizaremos el caso concreto del corte ortogonal. También se hablará sobre las dificultades que presentan las aleaciones de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V en el mecanizado. En último lugar, explicaremos en qué consiste el método de los elementos finitos, que es el método que hemos utilizado nosotros para la realización de este proyecto.

#### **2.1.- ALEACIONES DE TITANIO.**

##### ***2.1.1.- Generalidades del Titanio.***

El titanio es el noveno elemento, por orden de abundancia, en la corteza terrestre, y el cuarto metal, tras el hierro, el aluminio y el magnesio, en peso. Es habitual encontrar dicho material en forma de óxido, en la escoria de ciertos minerales y en las cenizas de animales y plantas.

El titanio no se encuentra libre en la naturaleza y para obtenerlo de los minerales que lo contienen se utiliza normalmente el método Kroll, que consiste en la reducción del tetracloruro de titanio con magnesio molido, en una atmósfera de argón para evitar su oxidación, y así obtener un sólido poroso, que se conoce como esponja de titanio.



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

El titanio es un metal de transición de color gris plata, el cual suele competir en aplicaciones técnicas con el acero (en especial con el acero inoxidable), ya que es mucho más ligero. Unas de sus propiedades más importantes son la alta resistencia a la corrosión y su resistencia mecánica, pero su elevado precio comparado con el acero, limita mucho su uso.

Es importante mencionar que este metal presenta dimorfismo, es decir: a bajas temperaturas cristaliza en forma hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ), y por encima de una temperatura aproximada de 885,2 °C cristaliza en una estructura cúbica centrada en el cuerpo (fase  $\beta$ ). El diferente comportamiento frente a la deformación de los dos tipos de redes, permite disponer de un metal resistente y poco deformable a temperatura ambiente en la fase  $\alpha$  fácilmente deformable en la fase  $\beta$ . Sin embargo su baja conductividad térmica origina problemas de calentamiento local y dificulta los tratamientos térmicos [5].

### ***2.1.2.- Clasificación de las aleaciones de Titanio.***

El dimorfismo que presenta el titanio, ofrece la posibilidad de obtener aleaciones con microestructuras de tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\alpha / \beta$ , dependiendo de los elementos aleantes que estabilizan una u otra fase. Según la capacidad de los aleantes de estabilizar la fase  $\alpha$  o  $\beta$ , se definen tres tipos de aleaciones de titanio:

- **Aleaciones tipo  $\alpha$ :** presentan poca ductilidad, pero buen comportamiento a fluencia.
- **Aleaciones tipo  $\beta$ :** presentan buena resistencia en frío y buena conformabilidad.
- **Aleaciones tipo  $\alpha / \beta$ :** mezcla de fase  $\alpha$  y fase  $\beta$ . La aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V se clasifica dentro de este grupo y hay que destacar su baja conductividad térmica, su elevada dureza y su bajo módulo de elasticidad.

Los principales procesos de fabricación de las aleaciones de Titanio son los siguientes:



- fundición,
- forja,
- soldadura,
- extrusión,
- embutición,
- mecanizado,
- fresado químico,
- rectificado de precisión,
- pulvimetalurgia.

A continuación proseguimos hablando de la aleación de titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, que es sobre la cual se ha centrado el estudio del presente proyecto.

### ***2.1.3.- Aleación de Titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V.***

Comercial y técnicamente existen muchas aleaciones de titanio, pero la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V es la de uso más extendido y representativa, y es la aleación que se ha utilizado para la realización del presente proyecto. Es una aleación del tipo  $\alpha + \beta$ , y como se puede deducir de su denominación, contiene un 6% de aluminio y un 4% de vanadio. El aluminio incrementa la temperatura entre la fase alfa y beta; y el vanadio disminuye esa temperatura.

A las aleaciones de titanio también se las puede clasificar según diferentes grados, la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V se produce en diferentes grados (siendo los más usados los de grado 5, 23 y 29) dependiendo de la cantidad de oxígeno que tenga cada una de ellas, lo cual va a hacer variar las propiedades mecánicas de la aleación. La aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V más utilizada, y por lo tanto en la que se ha centrado nuestro proyecto, es la de grado 5 y se suele aplicar cuando se requiera una alta resistencia mecánica y altas temperaturas.

A continuación mostramos una serie de tablas donde se va a mostrar la **composición del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V (tabla 2.1) y sus propiedades físicas (tabla 2.2).**





Tabla 2.1.- Composición del  $Ti_6Al_4V$  [3].

	Contenido
<b>C</b>	< 0.08 %
<b>Fe</b>	< 0.25 %
<b>N<sub>2</sub></b>	< 0.05 %
<b>O<sub>2</sub></b>	< 0.2 %
<b>Al</b>	5.5 - 6.76 %
<b>V</b>	3.5 - 4.5 %
<b>H<sub>2</sub> (lámina)</b>	< 0.015 %
<b>H<sub>2</sub> (barra)</b>	< 0.0125 %
<b>H<sub>2</sub> (moldura)</b>	< 0.01 %
<b>Ti</b>	Hasta completar el 100%

Tabla 2.2.- Propiedades físicas del  $Ti_6Al_4V$  [4].

Propiedad	Valor típico
<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>	4.42
<b>Punto de fusión (°C)</b>	1649
<b>Calor específico (J/kg·°C)</b>	560
<b>Resistencia eléctrica (ohm·cm)</b>	170
<b>Conductividad térmica (W/m·K)</b>	7.2
<b>Coefficiente de dilatación térmica (0 - 100 °C/ °C)</b>	$8.6 \cdot 10^{-6}$

Por último cabe destacar algunas de las **características** más importantes de esta aleación:

- elevada resistencia a altas temperaturas,
- mala maquinabilidad,
- muy ligera,
- baja conductividad térmica,
- usada en la industria aeroespacial,
- usada en la industria biomédica,
- capacidad de endurecimiento.



### **2.1.4.- Aplicaciones de las aleaciones de Titanio.**

Como ya se ha mencionado anteriormente, el Titanio posee buenas propiedades mecánicas, que unidas a su resistencia y su peso ligero, lo convierten en un material sustituto del aluminio y con diversas aplicaciones. Actualmente, existe la necesidad de encontrar materiales biocompatibles y propiedades adecuadas para un buen comportamiento a largo plazo. Los materiales más destacados por su uso como biomateriales son los aceros inoxidable, las aleaciones CoCr y diversas aleaciones de titanio, por este motivo vamos a proceder a explicar algunas de las aplicaciones más importantes de las aleaciones de titanio:

#### **Aplicaciones biomédicas**

El titanio es un metal biocompatible, ya que los tejidos del organismo toleran su presencia sin ningún tipo de reacción alérgica del sistema inmunitario. Esto unido a sus buenas propiedades mecánicas han hecho posible una gran cantidad de aplicaciones médicas como pueden ser: implantes dentales, componentes de válvulas cardíacas y marcapasos, prótesis de cadera y rodilla, material quirúrgico, etc. Las aleaciones que se emplean en medicina son aquellas que contienen aluminio y vanadio, como por ejemplo la aleación de  $Ti_6Al_4V$ , la cual se estudia en este proyecto (*figuras 2.1 y 2.2*).

Existen varias razones por las que se puede considerar el titanio como un material ideal para implantes endoóseos:

- es un material inerte, lo cual significa que no se liberan iones que puedan reaccionar con las moléculas orgánicas,
- el titanio se convierte en una superficie sobre la cual crece el hueso y se adhiere el metal, formándose un anclaje rígido.



Figura 2.1.- Implante dental de titanio [6] y [7].



Figura 2.2.- Conjunto de prótesis de cadera de titanio [8] y prótesis de rodilla de titanio [9].

### **Aplicaciones en la industria energética**

El titanio es muy utilizado tanto en centrales térmicas eléctricas como nucleares, debido especialmente a sus características de resistencia mecánica. Algunas aleaciones de titanio se utilizan para fabricar componentes como bombas, depósitos, reactores químicos y columnas de fraccionamiento .

### **Aplicaciones en la industria automovilística**

La industria automovilística es un sector que ha incorporado muy recientemente a su fabricación componentes de titanio, con el fin de aligerar su peso. Los elementos que se están fabricando de titanio son los muelles (ya que se mejora la calidad de la suspensión) y las bielas.



### **Aplicaciones en la industria militar**

El titanio se utiliza en la industria militar como material de blindaje, en la carrocería de vehículos ligeros, en la construcción de submarinos nucleares y en la fabricación de misiles.

### **Aplicaciones en la industria aeroespacial**

Tanto el titanio como sus aleaciones se emplean en la construcción aeronáutica para construir forjados estructurales de los aviones, discos de ventilación, álabes y palas de turbinas, ya que poseen elevada fuerza, baja densidad y pueden soportar temperaturas muy altas (*figura 2.3*).



*Figura 2.3.- Ejemplos de aplicaciones del titanio en la industria aeroespacial [10] y [11].*

### **Aplicaciones en la construcción naval**

El titanio y algunas de sus aleaciones son muy utilizadas en la fabricación de hélices, cascos de cámaras de presión submarina, plataformas petrolíferas, etc. debido a su alta resistencia a la corrosión.

### **Aplicaciones en la industria relojera**

En muchas ocasiones se utiliza el titanio y sus aleaciones para la fabricación de relojes con el fin de aligerar su peso y protegerlos de la corrosión. La parte que se suele



fabricar de titanio suele ser la caja del reloj e incluso en ocasiones las corras de sujeción.

### **Aplicaciones en instrumentos deportivos**

Actualmente se realizan diversos productos deportivos con titanio, como palos de golf, bicicletas, cañas de pescar, raquetas, etc. para así hacerlos más ligeros (*figura 2.4*).



*Figura 2.4.- Ejemplos de aplicaciones deportivas: raqueta con el marco de titanio [12] y bicicleta de titanio [13].*



## 2.2.- MECANIZADO.

### 2.2.1.- Mecanizado como proceso de fabricación.

• **Proceso de mecanizado como un proceso de fabricación:** El proceso de mecanizado es un proceso de fabricación que, partiendo de una materia prima y aportándole valor añadido, obtiene un producto diferente que satisface las necesidades del fabricante o el cliente. A continuación mostramos un gráfico que lo representa (Figura 2.5).

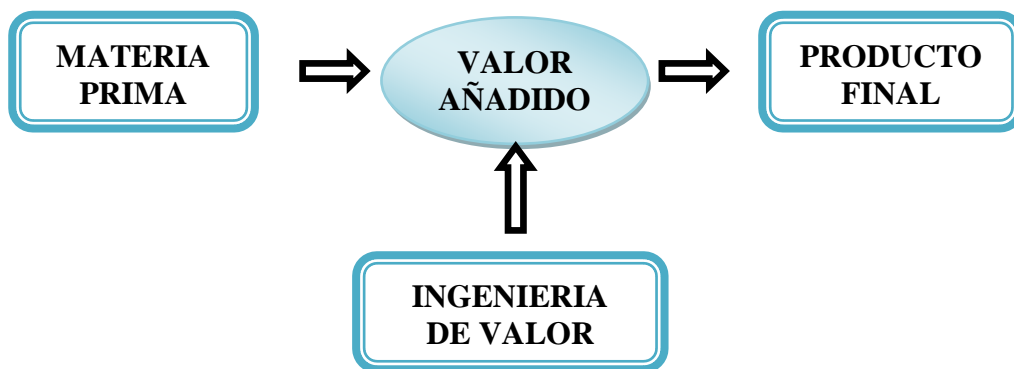


Figura 2.5.- Proceso de fabricación.

Todo proceso de fabricación comprende gran variedad de materias y campos de actuación, y por ello un gran número de alternativas para su clasificación, como por ejemplo en función de: producto final obtenido, material sobre el que se trabaja, sector industrial al que se destina el producto, características del proceso, máquina y herramienta utilizada, grado de calidad del producto obtenido, etc.

Dentro de las diferentes alternativas de clasificación, la que se encarga de definir un proceso de fabricación según las características del proceso, es uno de los procedimientos clásicos que a grandes rasgos distingue entre:

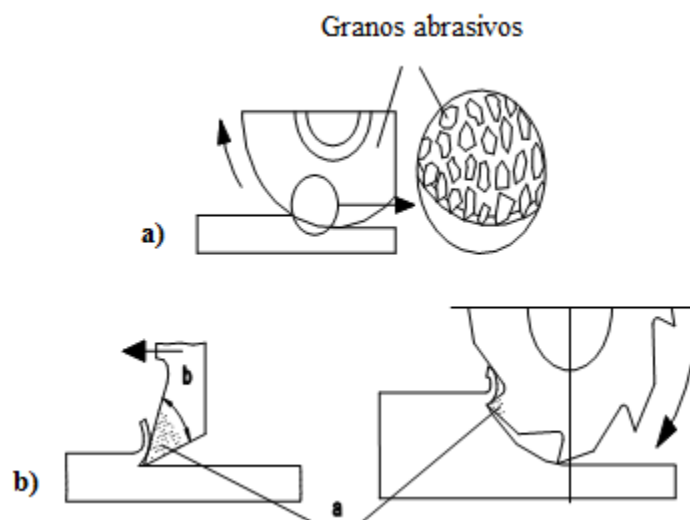
- conformado por eliminación de material,
- conformado adhiriendo nuevo material,
- conformado deformando plásticamente la materia inicial.

Es en el primer conjunto donde se encuentra definido el proceso de **mecanizado**, que abarca gran diversidad de posibilidades, entre las cuales las más importantes según la máquina utilizada son: tipo torno, tipo fresadora y tipo taladradora.

### 2.2.2.- Definición de mecanizado.

El mecanizado es un proceso mecánico de fabricación en el cual se realizan una serie de operaciones de conformado de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión, y con herramientas de filo.

Dependiendo del tipo de filo de la herramienta se definen dos tipos de procesos de mecanizado; procesos de arranque con filos geoméricamente determinados y procesos con filos no determinados (*Figura 2.6*). En el primer caso la viruta se genera gracias a uno o varios filos bien determinados y en el segundo gracias a herramientas con filos geoméricamente sin determinar, como pueden ser granos abrasivos.



*Figura 2.6.- a) Filos geoméricamente sin determinar; b) Filos geoméricamente determinados [14].*

A su vez los procesos de arranque de viruta pueden ser de dos tipos; ortogonal u oblicuo. El mecanizado ortogonal es aquel en el que el filo de corte es perpendicular a la dirección del desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza; y en el caso del corte oblicuo existe un cierto ángulo (*Figura 2.7*).

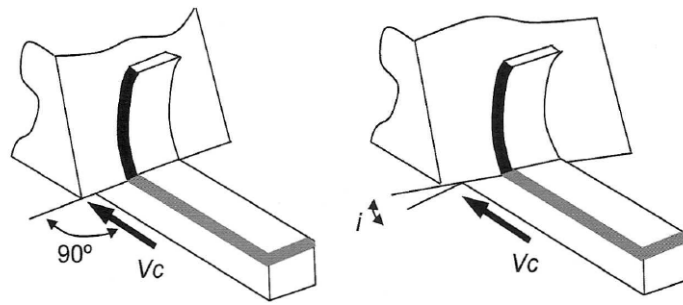


Figura 2.7.- Corte ortogonal y oblicuo, con inclinación  $i$  [15].

Para el mecanizado de la mayoría de los materiales se suele utilizar un corte oblicuo, ya que las herramientas pueden ser discretizadas como la suma de los filos de corte rectos, donde cada uno de ellos puede considerarse como una herramienta en una operación de corte oblicuo como mostramos en la figura 2.8:

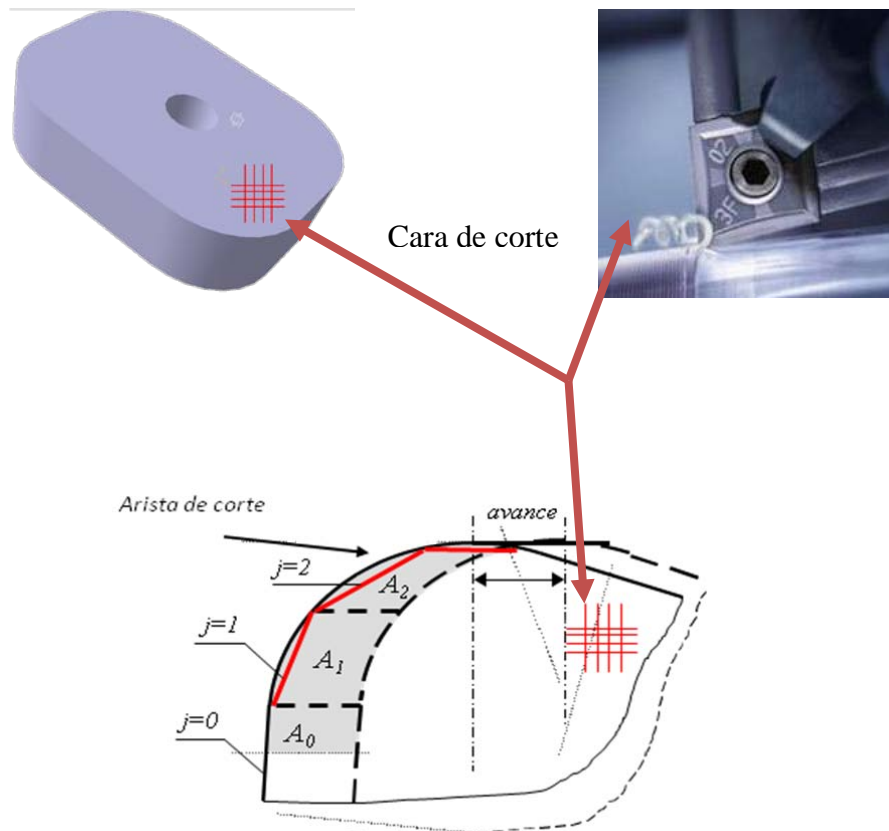


Figura 2.8.- Discretización de una herramienta como la suma de filos de corte rectos

[16].



Existe un inconveniente con el corte oblicuo, y es que las fuerzas de corte se descomponen en tres componentes en lugar de dos como ocurre con el corte ortogonal. La relación entre las fuerzas depende de la geometría de la herramienta, el ángulo de cizalladura y el ángulo del filo, dificultando todo esto su análisis (figura 2.9).

Por ello en el corte oblicuo es necesario hacer el estudio espacial de la geometría de las herramientas de corte, teniendo en cuenta dos hechos de importancia:

- las herramientas cortan en muchas operaciones de torneado, fresado y taladrado con dos filos simultáneamente (primario y secundario),
- hay herramientas de filos curvos, como las fresas de cabezas esféricas o tóricas, donde la inclinación del filo es variable en cada punto de corte.

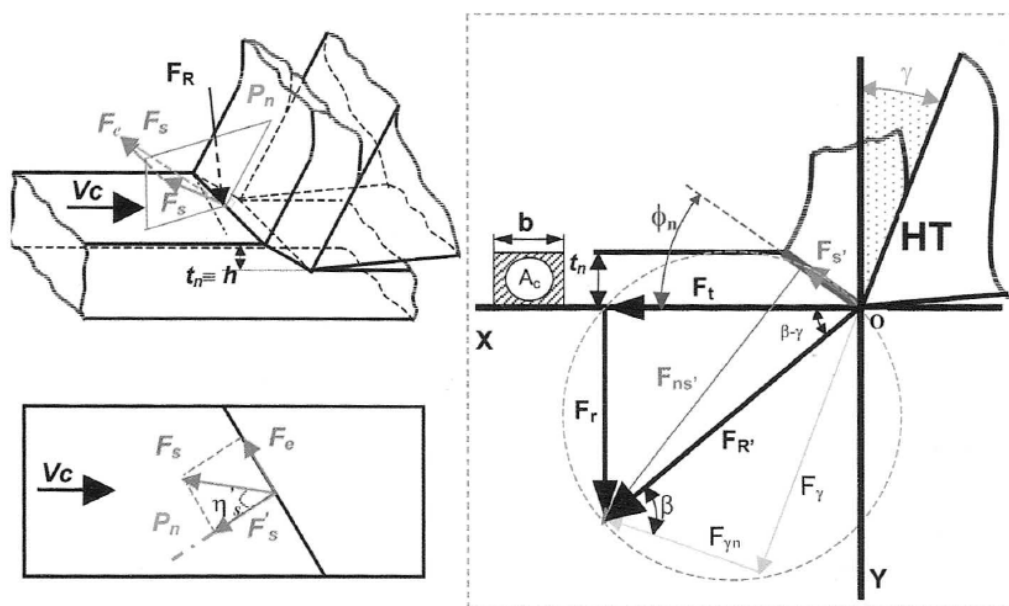


Figura 2.9.- Complejidad geométrica del corte oblicuo. Derecha: descomposición de las fuerzas en un plano perpendicular al filo [15].

Por el contrario, el corte ortogonal es el método más simplificado de proceso de arranque de viruta y es el que se suele utilizar en las simulaciones numéricas de mecanizado. Su simplicidad y utilidad permiten obtener información acerca de variables que son difíciles de medir y se puede considerar una buena aproximación ya que el valor del ángulo de un corte oblicuo no suele superar los  $15^\circ$ .



Por todo lo dicho anteriormente, el corte ortogonal será el tipo de corte que utilizaremos en el presente proyecto y será explicado con más detalle en el siguiente punto de este capítulo.

### ***2.2.3.- Generalidades del mecanizado.***

#### **A.- Movimientos para el arranque de viruta en el mecanizado.**

En los procesos de mecanizado, es fundamental que se generen movimientos relativos entre la herramienta de corte y la pieza a mecanizar, de manera que se produzca una interacción entre ellas. Por ello se definen los siguientes tipos de movimientos:

- ***Movimiento de corte:*** es el movimiento que solo arranca viruta durante una revolución (movimiento circular) o durante una carrera (movimiento rectilíneo), sin movimiento de avance.
- ***Movimiento de avance:*** combinado con el movimiento de corte hace posible el arranque continuo de virutas.
- ***Movimiento de penetración:*** determina la profundidad del corte, y por tanto el espesor o ancho de la viruta que se desprende.
- ***Movimiento de aproximación:*** este no es un movimiento de mecanizado propiamente dicho, ya que con él no se arranca material. Son el conjunto de movimientos que realiza la herramienta para colocarse en la posición de inicio de corte y empezar a mecanizar.

A continuación procedemos a definir cuáles son los parámetros fundamentales en el corte de cualquier pieza.



### **B.- Parámetros fundamentales en el corte.**

Los parámetros de corte, son las magnitudes tecnológicas necesarias para conseguir realizar el proceso de arranque de viruta de forma óptima.

**Velocidad de corte ( $V_c$ ):** velocidad lineal relativa a la herramienta respecto de la pieza en la dirección y sentido del movimiento de corte (*figura 2.10*). A partir de este dato ( $V_c$ ) se pueden calcular las revoluciones por minuto a las que debe girar la pieza o la herramienta:

$$V_c = \frac{\pi d n}{1000}$$

- $\left\{ \begin{array}{l} V_c: \text{Velocidad de corte en } \left(\frac{m}{min}\right) \\ D: \text{Diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado) en (mm)} \\ n: \text{Revoluciones de la pieza o de la herramienta en un minuto (r.p.m)} \end{array} \right.$

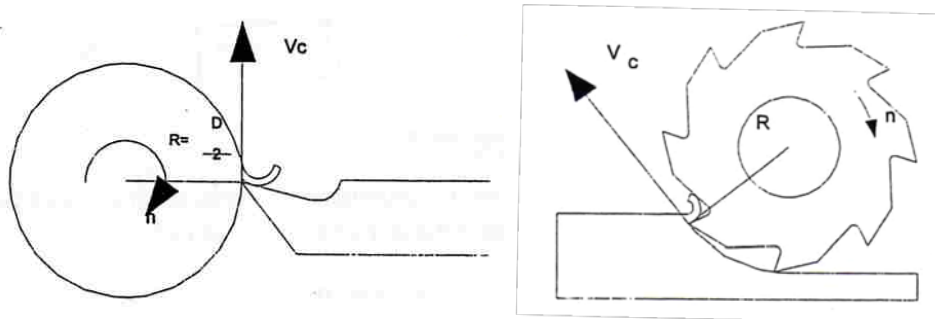


Figura 2.10.- Velocidad de corte en torneado y fresado [17].

**Avance (a):** es el desplazamiento de la herramienta en cada revolución o carrera [mm]. Conociendo la velocidad de giro (rpm) y el avance, podemos calcular la velocidad de avance como:

$$V_a = a n \text{ [mm/min]}$$



**Profundidad de corte (p):** es la distancia que penetra la herramienta en la pieza que se está mecanizando, se expresa en mm. Con la profundidad de corte y el avance se puede calcular la sección de la viruta (S) como:

$$S = a p \text{ [mm}^2\text{]}$$

Por último vamos a hablar de como se separa la viruta del material y los tipos de viruta que existen.

### **C.- Mecanismo de formación de la viruta.**

Se sabe que los materiales se rompen de muy diversas maneras, los más quebradizos se rompen en trozos grandes, mientras que los materiales dúctiles pueden sufrir un estiramiento antes de romper. La forma en la que se produce la rotura de las uniones internas del material depende de varios factores como las propiedades del material, las propiedades de la herramienta de corte y de la velocidad con que se produce el corte, entre otras.

Los factores básicos en la formación de viruta son: la herramienta (material de geometría), el material de trabajo (material, geometría y rigidez) y las condiciones de corte.

La forma y el tipo de viruta generada varía dependiendo del material de la pieza y los parámetros de corte, formándose diferentes morfologías (viruta continua, discontinua o segmentada). Destacando que cuanto más segmentación presente la viruta más sencilla será la eliminación o evacuación de la viruta, y esto es lo ideal y lo que se busca en la mayoría de los casos. Uno de los aspectos que se tratan a lo largo del presente proyecto es ver como varía la morfología de la viruta al variar los parámetros de corte y la geometría del material.



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

Existen localizaciones o zonas definidas teórica y experimentalmente en función de la generación de calor o aumento de la temperatura (Figura 2.11).

Zona primaria (1): es la zona principal de cizalladura y donde la deformación plástica va a tener especial importancia. Aquí el material es sometido a niveles altos de tensión y temperatura debido al cambio brusco de dirección del flujo de materia en un tiempo muy corto.

Esta zona va a ser el principal objeto de estudio, sobre las simulaciones realizadas en este proyecto, con el fin de conseguir definir el ancho de banda de cizalladura y el valor de las deformaciones que se producen en ella.

Zona secundaria (2): en esta zona se produce el contacto directo entre la herramienta y la viruta generada. A lo largo de toda la longitud de contacto, el fenómeno de fricción y la presión entre ambas superficies, va a tomar especial importancia, ya que producirá un incremento de la temperatura que puede dar lugar a la fusión del material mecanizado, sobre todo en la punta de la herramienta generando un *filo recrecido*.

Zona terciaria (3): es la zona de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo o superficie mecanizada. Es muy difícil cuantificar las presiones y temperaturas que prevalecen en esta zona. Es importante destacar que la calidad de la superficie de la pieza acabada está fuertemente influenciada por el contacto en esta área.

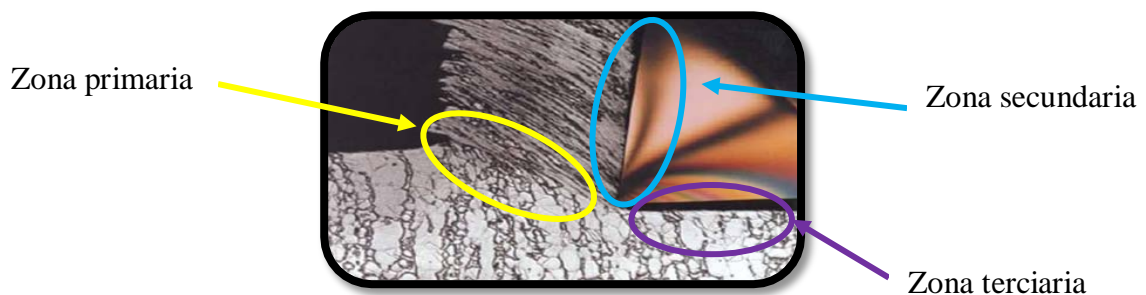


Figura 2.11.- Zonas principales de generación de calor.

Para concluir explicamos cuáles son los *procesos de separación de la viruta* del material:

- **cortadura o recalcado:** el material se desplaza por el filo y penetra en él,
- **corte:** se corta una parte de la viruta debido a que el esfuerzo cortante es mayor que la resistencia de corte del material.
- **fluencia o salida de viruta:** el desprendimiento de la viruta depende del material que se esté mecanizando, y esta puede ser continua, discontinua o segmentada, las cuales procedemos a explicar a continuación.

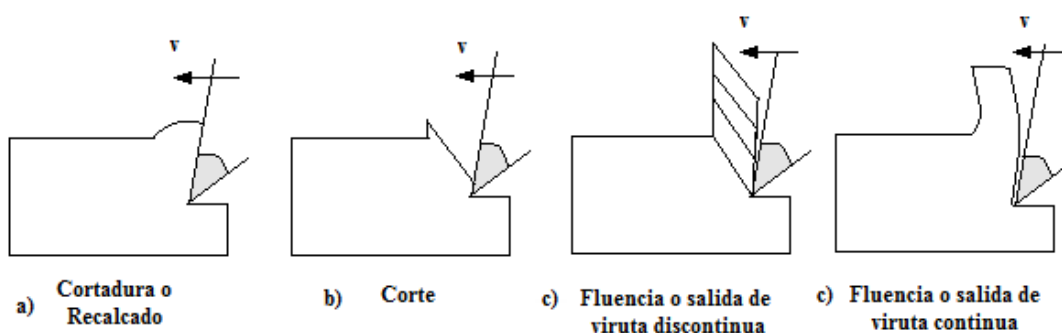


Figura 2.12.- Proceso de arranque de viruta en el mecanizado.

#### D.- Morfología de la viruta.

La viruta obtenida tras un proceso de mecanizado, posee dos superficies, una en contacto con la cara de la herramienta (superficie de desprendimiento) y la otra la superficie original de la pieza. La cara que está en contacto con la herramienta suele ser brillante debido al rozamiento producido sobre la longitud de contacto, mientras que la superficie original de la pieza posee un aspecto rugoso y áspero, que se debe al propio proceso de corte. También es importante destacar que la viruta obtenida va a tener un espesor menor que la profundidad de corte y una dureza mayor a la de la pieza de trabajo. A continuación hablamos de los diferentes tipos de virutas que podemos encontrar.



- **Viruta continua:** es la que se produce en materiales dúctiles a altas velocidades de corte y/o grandes ángulos de desprendimiento, y poca fricción entre la viruta y la cara de la herramienta (*figura 2.13. a*)).

Aunque en general producen un buen acabado superficial, este tipo de viruta, continua y larga, no siempre es deseable y en la mayoría de los casos, se intenta evitar. Para ello la herramienta debe contar con un rompe virutas que retuerce la viruta y la quiebra en tramos cortos.

- **Viruta discontinua:** es la que presentan la mayoría de los materiales frágiles, como el hierro fundido y el latón fundido, y se produce cuando los esfuerzos que se localizan delante del filo de corte provocan fractura. Lo anterior se debe a que la deformación real del esfuerzo cortante excede el punto de fractura en la dirección del plano de corte, haciendo que el material se desprenda en segmentos muy pequeños según se va produciendo (*figura 2.13 b*)).

Por norma general se produce un acabado superficial bastante aceptable en los materiales frágiles, ya que el filo tiende a reducir las irregularidades.

Este tipo de viruta también puede aparecer en algunas condiciones con materiales que son más dúctiles, causando una superficie más rugosa.

- **Viruta segmentada:** este tipo de viruta también es conocido como viruta no homogénea, y es una viruta con zonas de baja y alta deformación cortante. Este es el tipo de viruta deseable para cualquier proceso, ya que es mucho más fácil su evacuación y es menor la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta, siendo esto favorable (*figura 2.13. c*)).



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

Los metales con baja conductividad térmica y con una resistencia que disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura, como el titanio, muestran este comportamiento. La viruta tiene un aspecto de dientes de sierra y está compuesta de elementos parcialmente unidos y ligados entre sí.

La herramienta ha de tener la rigidez adecuada, ya que las fuerzas de corte varían continuamente apareciendo vibraciones, y daría lugar a una baja calidad superficial y mala precisión dimensional.

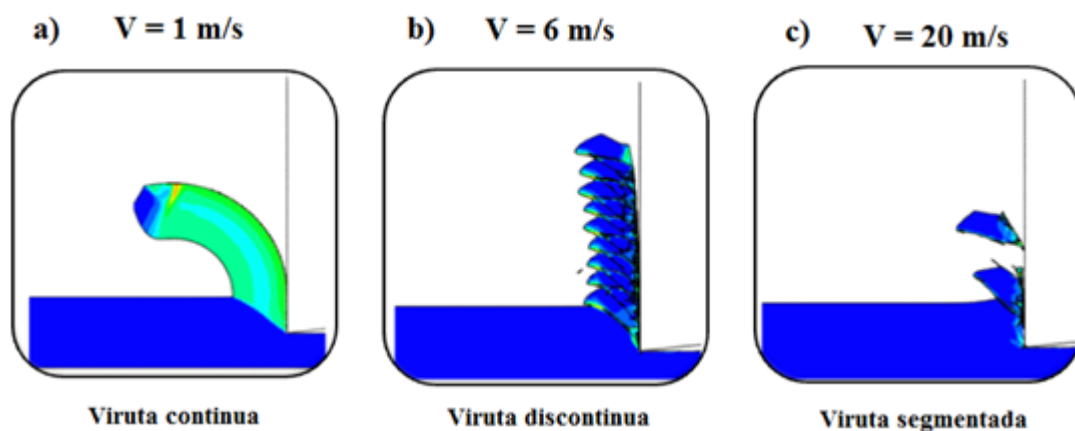


Figura 2.13.- Diferentes tipos de viruta obtenidos de las simulaciones realizadas de mecanizado ortogonal de la aleación  $Ti_6Al_4V$  para una fricción de valor  $\mu = 0,1$ . a) viruta continua, b) viruta discontinua y c) viruta segmentada.

Para el caso de la aleación de titanio  $Ti_6Al_4V$  estudiada, se obtiene una viruta segmentada, y ello es debido a la baja conductividad térmica que presenta este material; aunque también se obtiene en algunos casos, dependiendo de la velocidad utilizada, viruta continua o arrancada.

Existe un fenómeno muy relacionado con los procesos de formación de viruta, que recibe el nombre de **filo recreado**. Éste fenómeno suele aparecer cuando se mecanizan materiales dúctiles a bajas velocidades; y hay que intentar evitarlo, ya que produce mecanizados de mala calidad y vibraciones durante el proceso, debido a las altas presiones que se generan en la zona de contacto entre la herramienta y la viruta, produciéndose una soldadura de partículas de viruta con el filo de la herramienta.





Para evitar este fenómeno, es aconsejable aumentar la velocidad de corte, lubricar, utilizar herramientas con los materiales adecuados (metales duros o cerámicos), o aumentar el ángulo de desprendimiento, entre otros.

**E.- Efectos de la velocidad de corte sobre la morfología de la viruta generada y sobre las fuerzas de corte.**

A partir de los estudios realizados en este proyecto, se intentará dar una visión más concreta de cómo afecta la variación de la velocidad de corte en la morfología de la viruta desprendida y en los valores de las fuerzas de corte.

- **Efecto sobre la morfología de la viruta generada.**

Al observar la formación real de la viruta bajo distintas condiciones de corte en un metal, se ven desviaciones apreciables del modelo ideal. Para describir la generación de virutas en el proceso de torneado exterior de un material, se han de estudiar gran variedad de casos. La forma y geometría de la viruta está vinculada a la forma de la herramienta y a las condiciones de corte. Esta información es importante para juzgar la maquinabilidad de un material.

Una rotura de la viruta corta o segmentada, es óptimo en el proceso de corte, ya que no afectará a la superficie mecanizada ni a los elementos que la rodean.

Con una velocidad de corte convencional, la temperatura de la viruta sin deformar es menor, y la que se genera lo hace por cizalladura en la zona primaria de corte. Esta zona de la viruta está muy deformada y se produce un endurecimiento del material por deformación que dificulta su rotura, lo que da lugar a una viruta continua.

Una velocidad de corte mayor, podrá dar lugar a una viruta segmentada. El proceso de corte en este caso ya no es estable, ya que el proceso de endurecimiento por deformación será compensado por el reblandecimiento térmico del mismo. Un aumento



de la temperatura en el corte, dará lugar a un ablandamiento del material y con ello una menor resistencia a la deformación, lo que facilita la rotura de la viruta.

- **Efecto sobre las fuerzas de corte.**

Mediante la realización de varias mediciones de las fuerzas resultantes en función de las velocidades de corte, los resultados dan lugar a diversas conclusiones.

Las fuerzas de corte disminuyen con el aumento de la velocidad de corte, al igual que ocurre con la formación de la viruta, que varía de mayor a menor medida de continua a segmentada. Por lo tanto, se puede decir que los mecanismos de corte que llevan a decrecer las fuerzas resultantes, son similares a los que varían la morfología de la viruta de continua a segmentada.

Toda la energía que se consume en el proceso de corte se disipa en forma de calor. Como ya se ha comentado, existen tres focos de concentración de la energía, de entre los cuales la interfase viruta herramienta (zona secundaria) y la zona de cizalladura primaria (zona primaria), son las que van a influir en las resultantes de las fuerzas de corte y de avance.

Cuando la velocidad de corte aumenta, aumenta la temperatura en estas zonas notablemente. En el ancho de la banda de cizalladura, el material se ablanda según su sensibilidad al incremento de la temperatura, con ello el esfuerzo necesario para romper el material es menor, y la fuerza de corte que se tiene que aplicar con la herramienta también será menor.

Por otro lado, el aumento de la temperatura en la zona secundaria, da lugar a condiciones de fricción diferentes, disminuyendo la fricción y con ella la resistencia al deslizamiento entre superficies, gracias a esto las fuerzas de avance también se hacen más pequeñas.

A lo largo de todas las explicaciones que se han ido dando de cómo influye la velocidad de corte sobre la morfología de la viruta y sobre las fuerzas de corte, han



tomado especial relevancia los conceptos de endurecimiento por deformación y la sensibilidad al aumento de la temperatura. A estos dos conceptos, hay que unirles la sensibilidad a la velocidad de deformación del material.

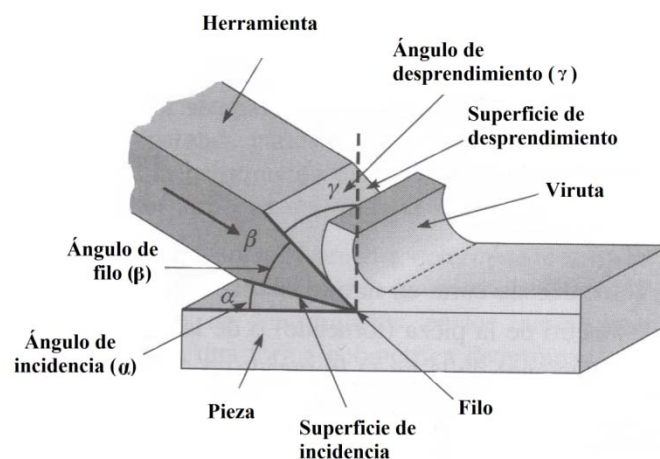
Estos tres conceptos, se encuentran implementados en forma de parámetros dentro de la ecuación que rige el comportamiento del material Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V a analizar en este proyecto, y que se basa en la **Ley de Johnson Cook**.

Todos estos parámetros junto con la velocidad de corte forman el conjunto de variables independientes a tratar mediante el MEF (Método de Elementos Finitos) en este proyecto.

Se verá la influencia del aumento de la velocidad de corte sobre el conjunto de variables dependientes como: las fuerzas de corte, la morfología de la viruta, la frecuencia de aparición de las bandas de cizallado y el ancho de las bandas.

#### **2.2.4.- Corte ortogonal.**

A continuación procedemos a estudiar el caso más simplificado de los procesos de arranque de viruta, el corte ortogonal, que como ya se ha dicho anteriormente, es en el que el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del desplazamiento relativo entre la herramienta y la pieza. Para definir algunos de sus elementos nos ayudamos de la *figura 2.14*:



*Figura 2.14.- Ángulos en el corte ortogonal [18].*



En el corte ortogonal existen ciertos elementos importantes en lo que se refiere a la herramienta, como son:

- **el filo o arista cortante:** que es la arista que va a cortar el material,
- **la superficie de ataque o de desprendimiento:** que es la cara sobre la que va a deslizar la viruta desprendida,
- **la superficie de incidencia:** que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie mecanizada de la pieza.

#### **A. ÁNGULOS EN EL CORTE ORTOGONAL.**

A continuación procedemos a explicar cuáles son los *ángulos* que definen la posición de las superficies mencionadas anteriormente (*figura 2.14.*).

- **Ángulo de incidencia( $\alpha$ ):** está formado por las superficies de incidencia y el plano que contiene a la velocidad de corte y el filo.

Cuando el ángulo de incidencia es muy pequeño, aumenta el contacto con la pieza produciéndose un roce excesivo, un aumento en la temperatura, y por lo tanto un desgaste más rápido de la herramienta.

Por el contrario, si el ángulo de incidencia es demasiado grande, se debilita el filo. Por ello la elección del ángulo de incidencia debe hacerse en función del material de la pieza y de la herramienta.

- **Ángulo de filo o herramienta( $\beta$ ):** es el formado por las superficies de incidencia y de desprendimiento.



- **Ángulo de desprendimiento** ( $\phi$ ): ( el formado por la superficie de desprendimiento y el plano normal a la velocidad de corte y que contiene el filo.

Si el ángulo de desprendimiento es grande, la herramienta penetra y por tanto corta bien, produciéndose un buen acabado superficial, pero debilitándose el filo de la herramienta. Por el contrario, un ángulo de desprendimiento pequeño, favorece la resistencia de la herramienta pero aumenta tanto la energía consumida como el calentamiento de la herramienta.

Por tanto, el ángulo de desprendimiento más adecuado, será el mayor que la herramienta pueda soportar sin llegar a romperse, y su elección estará condicionada por la resistencia del material de la herramienta, el material a mecanizar y el avance.

Es importante recordar, que en función del ángulo de desprendimiento, las herramientas de corte se suelen clasificar en herramientas con geometría positiva ( $\gamma > 0$ ) y herramientas con geometría negativa ( $\gamma < 0$ ).

## **B. VELOCIDADES EN EL CORTE ORTOGONAL:**

Además de la velocidad de corte ( $V_C$ ), en los procesos de arranque de viruta intervienen otras dos velocidades (ver la *Figura 2.15*):

- **velocidad de corte ( $V_C$ )**: es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza en dirección y sentido del movimiento de corte,
- **velocidad de deformación o de cizallamiento ( $V_S$ )**: es la velocidad con la que rompe la viruta,
- **velocidad de la viruta respecto de la herramienta ( $V_v$ )**: es la velocidad de salida de la viruta.



Geoméricamente y conocidos los ángulos de cizalladura ( $\phi$ ) y de desprendimiento ( $\gamma$ ), junto con la velocidad de corte ( $V_C$ ), se construyen las expresiones que definen las velocidades descritas anteriormente.

$$V_v = V_C \frac{\sin \phi}{\sin \left( \gamma + \frac{\pi}{2} + \phi \right)}$$

$$V_s = V_C \frac{\sin \left( \frac{\pi}{2} - \gamma \right)}{\sin \left( \gamma + \frac{\pi}{2} + \phi \right)}$$

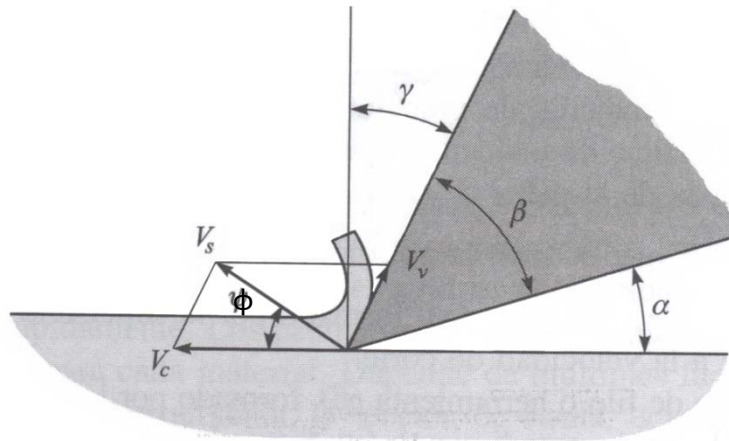


Figura 2.15.- Velocidades en el punto ortogonal [18].

### C. FUERZAS EN EL CORTE ORTOGONAL.

La determinación de las fuerzas de corte en el mecanizado permite conocer, no sólo las sollicitaciones dinámicas a las que se ve sometida la herramienta o la pieza, sino también el valor de la potencia requerida para poder efectuar el proceso.

Las fuerzas de reacción del material mecanizado, no actúan en el filo, sino en una zona más alejada que va a depender del ángulo de desprendimiento. De este modo podemos encontrar las siguientes fuerzas:

- **fuerza de corte ( $F_C$ ):** es la que nos va a permitir conocer la potencia necesaria,
- **fuerza de deslizamiento ( $F_d$ ) :** permite calcular las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta,
- **fuerza de rozamiento entre la viruta y la herramienta ( $F_r$ ).**

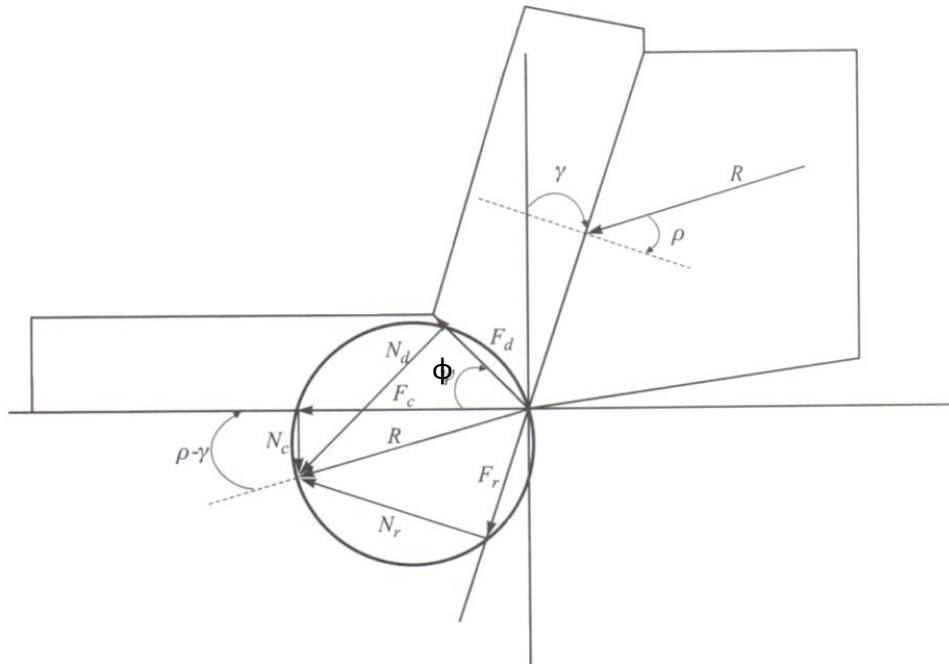


Figura 2.16.- Fuerzas en el corte ortogonal [18].

Por lo tanto vectorialmente y a partir de la figura obtenemos que:

$$R = F_c + N_c = F_d + N_d = F_r + N_r \quad \text{Donde:} \quad \begin{cases} F_c = R \cos(\rho - \gamma) \\ N_c = R \sin(\rho - \gamma) \\ F_d = R \cos(\phi + \rho - \gamma) \\ N_d = R \sin(\phi + \rho - \gamma) \\ F_r = R \sin \rho \\ N_r = R \cos \rho \end{cases}$$

De las expresiones de  $F_r$  y  $N_r$  obtenemos el coeficiente de rozamiento entre la viruta y la herramienta:

$$\mu = \frac{F_r}{N_r} = \frac{\sin \rho}{\cos \rho} = \tan \rho$$



### **2.2.5.- Mecanizado de las aleaciones de titanio [15].**

Este apartado lo vamos a dedicar para hablar de las dificultades que presentan las aleaciones de  $Ti_6Al_4V$  cuando son mecanizadas y también para realizar un estudio de la segmentación del titanio.

#### **2.2.5.1.- Dificultad del mecanizado de la aleación $Ti_6Al_4V$ .**

Las aleaciones de titanio se han considerado históricamente como materiales de difícil maquinabilidad. Uno de los problemas que presentan las aleaciones de titanio es que su mecanizado implica fuerzas de corte algo superiores a las necesarias en el mecanizado de aceros. Éste no es el problema fundamental, las aleaciones de titanio poseen unas características metalúrgicas que las hacen más difíciles de mecanizar que los aceros que tienen una dureza equivalente.

La baja maquinabilidad de esta aleación se debe a los siguientes factores:

- El titanio presenta una fuerte tendencia a alearse (es decir, tiene una gran reactividad química con los materiales de la herramienta de corte), lo que se ve favorecido por las altas temperaturas que surgen en la cara de desprendimiento. Éste fenómeno produce el desgaste de cráter, es decir, el material de la herramienta se alea con el titanio y se va adhiriendo en partículas muy pequeñas a la viruta produciéndose un socavón. Además dicho cráter suele estar muy próximo al filo, contribuyendo a un aumento del desgaste de flanco; lo cual va a provocar falta de precisión en el mecanizado.
- El  $Ti_6Al_4V$  tiene un módulo de elasticidad muy bajo, y es más elástico que el acero. La pieza tiende a alejarse de la herramienta debido a la acción de la fuerza de corte. Las piezas que tienen paredes delgadas, tienden a flexionarse bajo la presión de la herramienta, provocando así problemas de





precisión. Por tanto, la rigidez del conjunto herramienta-pieza-máquina, es muy importante, al igual que el uso de herramientas que estén muy bien afiladas.

- El deterioro superficial afecta a la resistencia a fatiga de la aleación provocando un proceso de mecanizado deficiente.

### ***2.2.5.2.- Estudio de la segmentación del titanio.***

El Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, pese a sus problemas, posee una virtud: que es la tendencia a generar viruta segmentada (*figura 2.17* y *figura 2.18*). Las bandas de deformación aparecen en las virutas incluso a velocidades de corte muy bajas y están relacionadas con la baja difusividad térmica de este material. El proceso sucede de la siguiente forma:

- El filo de la herramienta avanza sobre la pieza a mecanizar y la presión sobre dicho material inicia la cizalladura en la zona primaria (1 de la *figura 2.18*). Debido a la baja conductividad térmica de esta aleación, el calor producido por la cizalladura en la zona de corte no tiene tiempo de difundirse.
- La cizalladura se concentra en una zona alrededor del plano (2 de la *figura 2.18*), donde la energía de deformación se convierte en calor y produce un efecto de ablandamiento térmico en el material. Por tanto se produce una disminución de la resistencia a la deformación en ese plano. Incluso a velocidades de corte bajas, se produce la aparición de bandas de deformación adiabáticas, ya que el calor de la deformación no se ha conducido al resto del material, favoreciendo la deformación localizada en una zona casi plana.
- La herramienta avanza de forma continua hasta que en un cierto momento cede (3 de la *figura 2.18*) y se forma un segmento de viruta. Desde aquí comienza a repetirse el fenómeno anterior.

- El resultado final es una viruta segmentada con muy poca deformación, excepto alrededor de los segmentos, donde se ha concentrado toda la deformación plástica. La aparición de viruta segmentada es un fenómeno positivo ya que se facilita su evacuación, pero produce una inestabilidad constante en el proceso de corte.

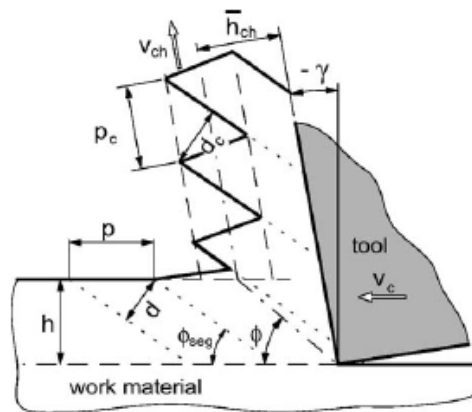


Figura 2.17.- Formación de la viruta segmentada [2].

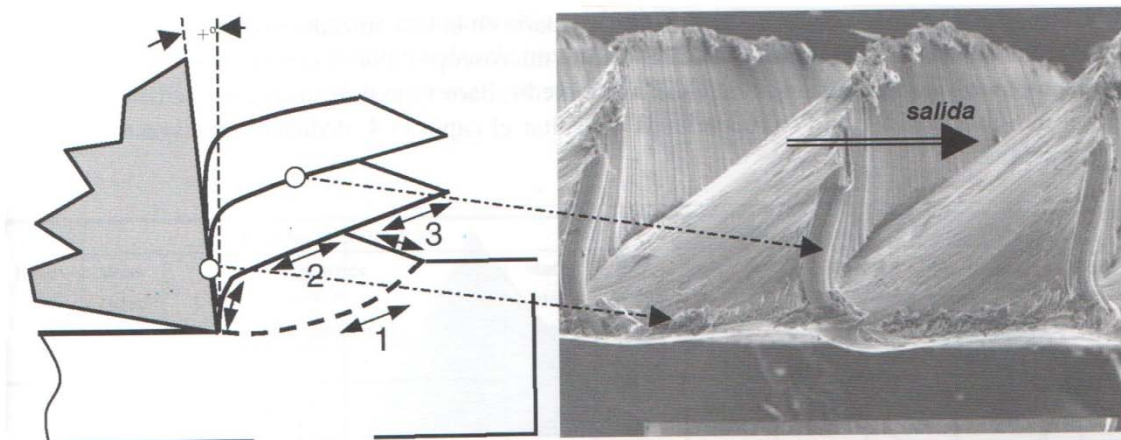


Figura 2.18.- Formación de viruta segmentada para la aleación  $Ti_6Al_4V$ : 1 plano de cizalladura, 2 segmentación, 3 formación de la viruta [15].



### **2.3.- ELEMENTOS FINITOS.**

Hoy en día existen potentes modelos de análisis basados en el MEF (Método de los Elementos Finitos), los cuales nos permiten reproducir comportamientos estructurales complejos con ecuaciones constitutivas no lineales. Dichos modelos, permiten realizar estudios previos a la realización experimental para analizar el problema a investigar y conocer cuáles son los parámetros que influyen en dicho problema. Y así poder obtener de forma aproximada cuáles serán los resultados previsibles de nuestro ensayo. Dicho estudio preliminar, sólo puede realizarse mediante la utilización de un modelo numérico que tenga en cuenta todas las variables que intervienen en el problema.

Gracias al modelo numérico vamos a poder comparar los resultados del modelo con los resultados obtenidos experimentalmente y así verificar la validación de dicho modelo, pudiendo proporcionar valores de variables que no han sido medidas experimentalmente. Un modelo completo requiere determinar la ecuación constitutiva que relaciona las tensiones y deformaciones en función de la velocidad de deformación, de la temperatura y el criterio de rotura del material. Aunque utilizando MEF nos acercamos bastante al diseño óptimo, este no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas que se consideran. Por lo tanto, se siguen necesitando los prototipos, pero en menor número.

Por tanto, el MEF consiste en la descomposición de un elemento físico continuo en un número finito de elementos (de ahí el nombre de elementos "finitos") que se unen entre sí mediante unos puntos llamados nodos. El movimiento de dichos nodos constituyen las incógnitas del problema. Dentro de cada elemento, los movimientos de cualquier punto se obtienen a partir de los nodos de dicho elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo con infinitos grados de libertad y gobernado por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número finito de grados de libertad y cuyo comportamiento se modela con un sistema de ecuaciones lineales o no.



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

Estos nodos generan una malla sobre la que se van a realizar los cálculos. Por tanto esta malla debe estar construida antes de realizar ninguna simulación. Una vez generado el mallado inicial, se le impondrán las diferentes condiciones de contorno del proceso e incluso se podrá redefinir el mallado inicial (utilizar una malla más fina) en zonas de interés para obtener resultados más precisos, pero a su vez más complicados.

Resumiendo, las actividades que se llevan a cabo en un programa de elementos finitos para realizar un cálculo son:

- **pre-proceso:** donde se define la geometría de la herramienta CAD, en 2D o 3D, se genera la malla, se asignan las condiciones de contorno y las propiedades de los materiales,
- **cálculo:** suele consistir en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse una seguida de la otra, y cuya entrada depende del resultado del pre-proceso,
- **post-proceso:** en esta etapa se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos en la fase de cálculo, y en ocasiones se realizan operaciones complementarias como métodos de suavizado, interpolación o determinación de errores. Una vez obtenida la solución, se puede representar gráficamente la distribución que se quiere analizar.

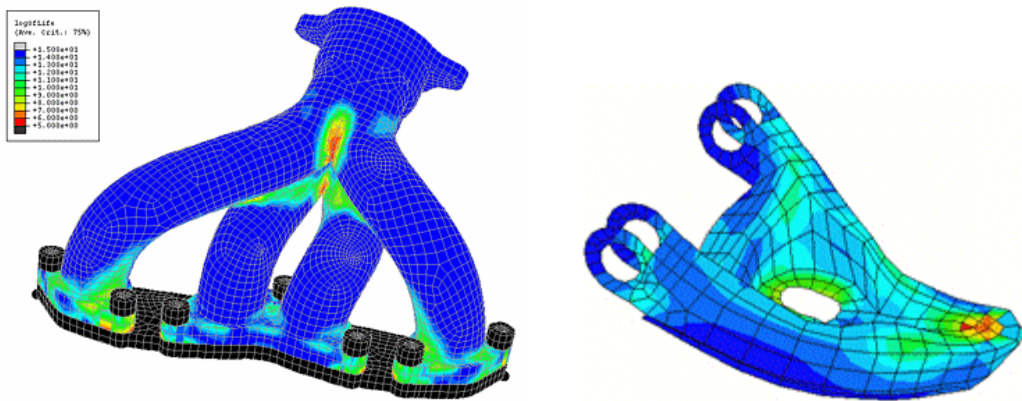
En este proyecto se ha utilizado como software ABAQUS, el cual sigue el método de elementos finitos para la resolución. ABAQUS está compuesto por varios programas, siendo ABAQUS/Explicit el utilizado para el presente proyecto, ya que permite realizar un análisis dinámico explícito que computacionalmente es más eficiente que un análisis dinámico implícito para modelos grandes con respuesta dinámica relativamente corta. Este tipo de análisis es usado en problemas cuasi-estáticos con condiciones de contacto complicadas.

El modelo que se ha elegido para este proyecto es un modelo lagrangiano, en el cual la malla se mueve solidariamente con el material.



Por último destacar que la elaboración y diseño del modelo, no forman parte del contenido de este proyecto, ya que conlleva un largo y minucioso trabajo, por ello ha sido facilitado de antemano.

A continuación, en la *figura 2.19* se muestran unos ejemplos de aplicación del Método de los Elementos Finitos.



*Figura 2.19.- Ejemplos de aplicación de MEF en ABAQUS/Explicit [19] y [20].*



## **Capítulo III**

### **3.- ESTUDIO EXPERIMENTAL.**

En este tercer capítulo nos centramos en recopilar la información de los principales estudios publicados a cerca del mecanizado ortogonal del titanio, en particular de la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. El objetivo es conocer qué se ha estudiado anteriormente al proyecto presente y recopilar datos experimentales para posteriormente comparar con los resultados obtenidos del modelo propuesto y así proceder a su validación.

#### **3.1.- CORTE ORTOGONAL EXPERIMENTAL DEL Ti<sub>6</sub>AL<sub>4</sub>V.**

Como se ha comentado anteriormente, las aleaciones de Ti son aleaciones termo-resistentes que son ampliamente utilizadas en aplicaciones de alta responsabilidad como son los motores de los aviones, debido a la alta resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas a altas temperaturas. Estas propiedades mecánicas y su baja conductividad térmica, hacen que estos materiales tengan una mala maquinabilidad en los procesos de corte comparados con otros metales. Asimismo, no se dispone de una amplia bibliografía con la cuál poder compara los resultados obtenidos con datos experimentales, y con otro tipo de metales.

El motivo por el que no se dispone de muchos resultados experimentales de mecanizado de materiales de baja maquinabilidad (como las aleaciones de Ti) es debido a su elevado coste, laboriosa preparación de ensayos y riesgos de salud que supone la inhalación de polvos de dichos materiales.

La investigación sobre la morfología de viruta se ha realizado principalmente viendo como varía ésta con parámetros como la velocidad de corte, el tamaño de la malla o la fricción entre la herramienta y la pieza a mecanizar entre otras.



Los modelos numéricos en los procesos de corte son ampliamente utilizados para mejorar la comprensión del mecanismo de generación de viruta y nos permiten obtener información a cerca de algunas variables difíciles de medir durante el proceso de mecanizado. El método de los elementos finitos ha sido ampliamente utilizado para simular los procesos de corte. El corte de alta velocidad de aleaciones termo-resistentes comúnmente producen viruta segmentada o con forma de dientes de sierra debido a las bandas de cizalladura adiabáticas en la zona de corte primario. Estos modelos numéricos deben ser capaces de reproducir los fenómenos de localización. Los resultados no sólo dependen de parámetros físicos, sino que también dependen de características numéricas como el tamaño de la malla y la geometría de la pieza [21]. El interés por las aplicaciones industriales tanto de aleaciones de Ti como de Ni, han motivado un gran número de trabajos científicos centrados en el mecanizado de estas aleaciones.

Como se ha venido comentando hasta el momento, los procesos de mecanizado se suelen realizar en corte oblicuo, pero en la mayoría de las simulaciones de mecanizado de estudios numéricos este caso se suele simplificar mediante corte ortogonal. Este caso es el que encontramos en la mayor parte de la bibliografía y el que estudiamos en este proyecto.

#### **PRESIONES ESPECÍFICAS DE CORTE Y AVANCE EXPERIMENTALES:**

Las figuras 3.1 y 3.2 son una recopilación de los resultados experimentales de las presiones específicas de corte (fuerzas por unidad de superficie) y de avance respectivamente, en función de la velocidad de corte. Estos resultados de la literatura van a servir para validar el modelo numérico presentado en el *Capítulo IV*.

Los autores cuyos artículos nos han servido de ayuda son: Hoffmeister et al. [26], Gente y Hoffmeister [2], Molinari et al. [26], Hua y Shivpuri [24], Cotterell y Byrne [22], Fang y Wu [3] y Armendia et al. [23].

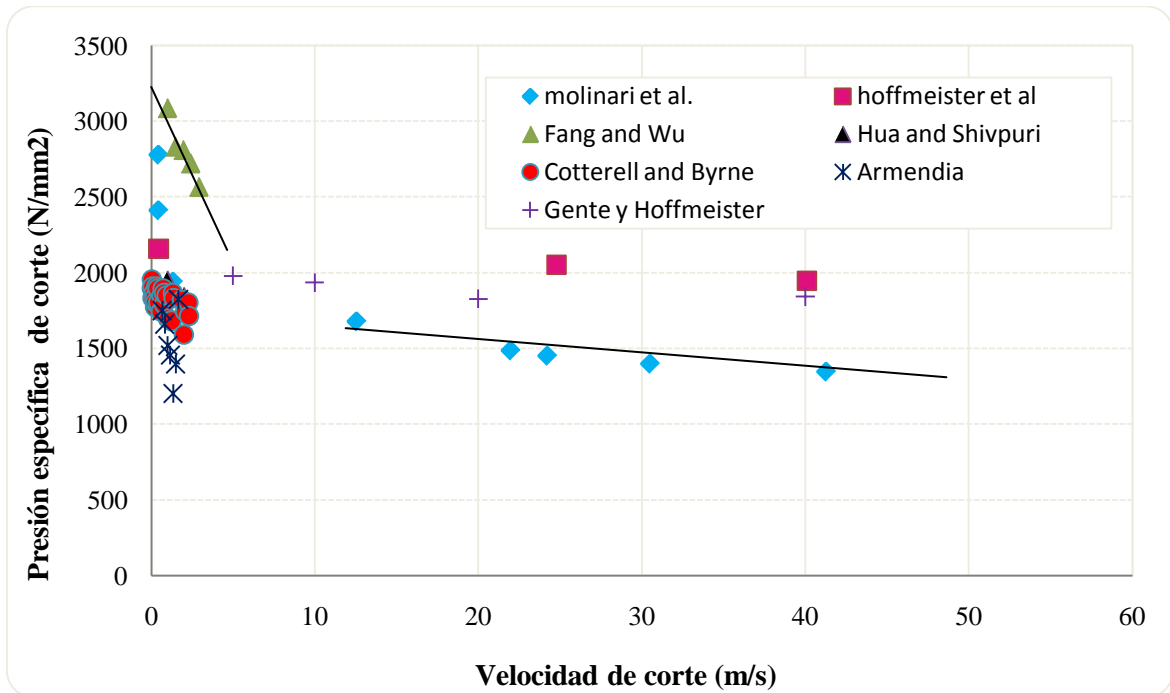


Figura 3.1.- Comparación de las presiones específicas de corte experimentales obtenidas en diversos estudios para diversas velocidades de corte.

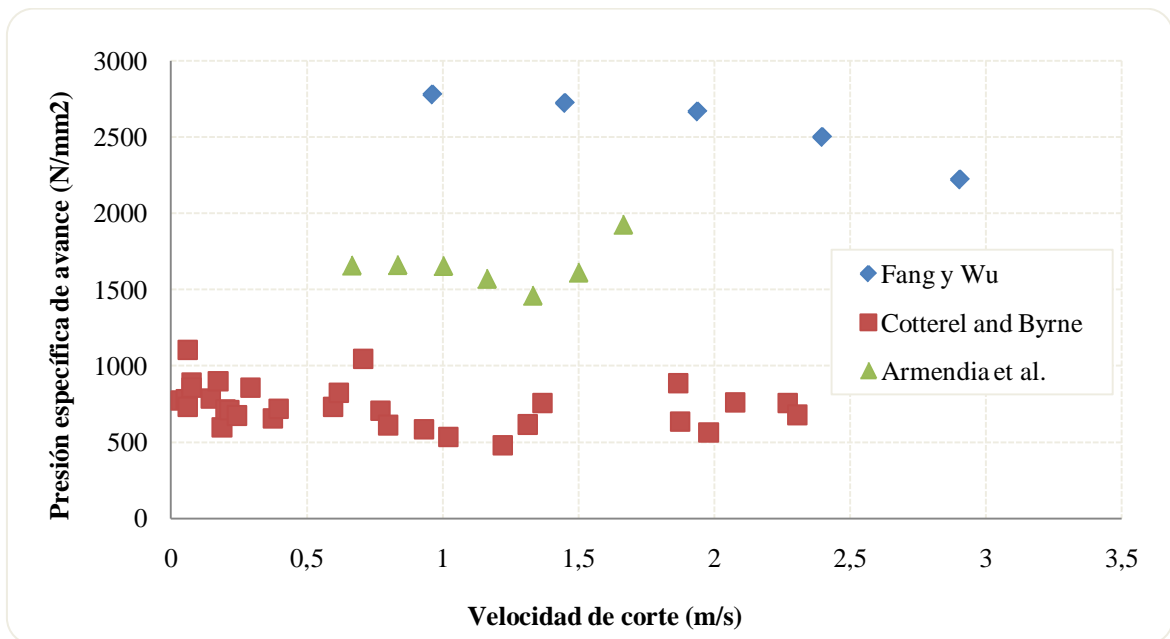


Figura 3.2.- Comparación de las presiones específicas de corte experimentales obtenidas en diversos estudios para diversas velocidades de corte.

Como se puede observar en la figura 3.1, existen dos tendencias claramente diferenciadas. Para velocidades de corte pequeñas (entre 0 y 3 m/s aproximadamente)





las fuerzas de corte disminuyen de forma progresiva a medida que aumenta la velocidad de corte hasta alcanzar un valor constante. Mientras que para altas velocidades de corte (de 3 m/s en adelante) las fuerzas de corte tienden a continuar con el valor constante y estacionario alcanzado. Como se puede apreciar, existen ciertas diferencias entre los resultados obtenidos por cada autor, pero esto es debido a que no todos los ensayos experimentales se han realizado bajo las mismas condiciones de corte (ángulo de desprendimiento, avance, etc.), no todas las piezas se han mecanizado con herramientas iguales y a que no todas las aleaciones de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V mecanizadas presentan el mismo tratamiento térmico superficial ni misma composición.

En cuanto a las presiones específicas de avance (*figura 3.2*) se puede observar una tendencia similar a la encontrada para las presiones específicas de corte, es decir, se aprecia como la fuerza de avance disminuye de valor al aumentar la velocidad de corte y alcanza un valor constante, aunque no se aprecia tan claramente como ocurre para las fuerzas de corte. Los valores de dichas fuerzas de avance varían bastante de un autor a otro y esto se debe principalmente al coeficiente de fricción medio entre el interfaz viruta - herramienta, ángulos de desprendimientos diferentes, morfología de la herramienta y el recubrimiento de la herramienta entre otros factores.

A continuación explicamos brevemente cuáles son algunas de las condiciones de corte utilizadas para cada experimento y los resultados más importantes de los mismos. Destacar que no todos los autores utilizaron rangos de velocidades de corte iguales. Algunos autores como Hoffmeister et al. [\[26\]](#) y Gente y Hoffmeister [\[2\]](#) únicamente realizaron experimentos para altas velocidades de corte, mientras que Hua y Shivpuri [\[24\]](#), Cotterell y Byrne [\[22\]](#), Fang y Wu [\[3\]](#) y Armendia et al. [\[23\]](#) únicamente realizaron experimentos para velocidades de corte convencionales (bajas). El único autor que ha hecho un estudio del mecanizado del titanio tanto para velocidades de corte convencionales como para altas velocidades es Molinari et al. [\[26\]](#).

En el estudio realizado por Hoffmeister et al. [\[26\]](#) se consideraron velocidades comprendidas entre 20 m/s y 100 m/s, sin existir datos experimentales para bajas velocidades de corte.



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

Gente y Hoffmeister [2] realizaron un estudio experimental a cerca de la formación de viruta de la aleación de titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V para un rango de velocidades de corte entre 300 m/min y 6000 m/min. Los experimentos se llevaron a cabo de forma ortogonal con una profundidad de 5 mm. Las pruebas se hicieron utilizando diferentes ángulos de desprendimiento y espesores de la viruta no deformada (avances), nosotros hemos escogido los resultados experimentales correspondientes a un ángulo de desprendimiento  $\gamma = 0^\circ$  y un avance de 0,08 mm, obteniéndose el resultado mostrado en la *figura 3.1*.

Molinari et al. [26] utilizaron velocidades de corte comprendidas entre 0,01 y 73 m/s, y analizaron la evolución de las fuerzas de corte con relación a la velocidad de corte y el desarrollo de las bandas de cizallado adiabáticas. Para bajas velocidades de corte (0,01 a 1 m/s) utilizaron una máquina de ensayo de impactos, mientras que altas velocidades (10 a 73 m/s) utilizaron ensayos de balística. Para la realización de sus experimentos mantuvieron constantes el ángulo de desprendimiento  $\gamma = 0^\circ$ , la profundidad de corte  $p = 10$  mm y el avance  $a = 0,12$  mm.

La evolución de las fuerzas de corte con la velocidad de corte es la representada en la *figura 3.1* en la que se observa un rápido descenso de la fuerza en el rango de velocidades de 0,01 a 10 m/s, seguido de una estabilización de la fuerza con valor 1500N. Dicho descenso de la fuerza puede ser debido a la reducción del coeficiente de fricción a lo largo de la interacción herramienta - viruta cuando la velocidad aumenta. Molinari et al. compararon sus resultados con los obtenidos por Larbi (1990) y Hoffmeister et al. (1999), y observaron que la tendencia era similar para velocidades mayores de 20 m/s, deduciendo por tanto que, la fuerza de corte es dependiente de la velocidad.

Hua y Shivpuri [24] realizaron una nueva interpretación de la segmentación de viruta en el corte de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. Se basaron en una simulación de elementos finitos implícita, Lagrangiana y rígido - visco plástica para el mecanizado de corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, para lo que aplicaron un modelo de esfuerzo dinámico para el inicio de la grieta durante el proceso de segmentación de viruta. Ellos compararon los resultados de



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

su modelo con los resultados experimentales obtenidos en sus ensayos para así poder validar el modelo.

Los ensayos experimentales los realizaron en un centro de torneado CNC a velocidades de corte de 60, 120 y 240 m/min, avances de 0,127 y 0,35 mm por vuelta y una profundidad de corte de 2,54 mm. Para realizar la comparación posteriormente con nuestros resultados teóricos, hemos escogido los resultados para un avance de 0,127 mm obteniéndose la curva representada en la *figura 3.1*.

Cotterell y Byrne [22] realizaron un estudio experimental a cerca del mecanismo de la segmentación de viruta durante el corte ortogonal para la aleación de titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, ayudándose para ello de imágenes a altas velocidades en la zona de corte. Para la realización de sus experimentos mantuvieron constante una profundidad de corte de 2 mm y un ángulo de desprendimiento  $\text{de}\gamma = 6,5^\circ$ , también utilizaron velocidades de corte desde 4 m/min hasta 120 m/min; y avances de 0.05, 0.075 y 0.1 mm. En todos ellos se observó formación de viruta segmentada y se realizaron mediciones detalladas en las secuencias de video grabadas tanto de la viruta segmentada como de las bandas de corte que separan los segmentos de viruta. La geometría de la viruta la relacionaron con los parámetros de corte dados anteriormente y estudiaron las deformaciones angulares tanto de los segmentos de viruta como de las bandas de cizallado. Para realizar la comparación con nuestros resultados numéricos posteriormente, hemos escogido los resultados experimentales obtenidos para un avance de 0,1 mm, obteniéndose la curvas representadas en las *figuras 3.1 y 3.2*.

Fang y Wu [3] se basaron en extensos datos experimentales generados a partir de cuarenta pruebas de corte ortogonal a alta velocidad sobre tubos de 1,4 mm de profundidad, utilizando cinco velocidades de corte distintas, cuatro velocidades de avance para cada tipo de material (0.075, 0.090, 0.105 y 0.120 mm) y un ángulo de desprendimiento de  $\gamma = 5^\circ$ . En sus estudios llegaron a la conclusión de que cuando la velocidad de corte aumenta, la fuerza de corte y la fuerza de avance disminuyen y que cuando la velocidad de avance aumenta, la fuerza de corte y la fuerza de avance disminuyen. Para la comparación de nuestros datos con los experimentales, hemos



escogido los resultados obtenidos para un avance de 0.09 mm, obteniéndose las curvas representadas en las *figuras 3.1* y *3.2*.

Armendia et al. [23] realizaron ensayos de flexión sobre barras cilíndricas para estudiar la maquinabilidad del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V. Para el estudio experimental mantuvieron constantes el avance, con un valor de 0,1 mm, la profundidad de corte de 2 mm y el ángulo de desprendimiento con valor  $\gamma = 7^\circ$ , y sólo variaron la velocidad de corte entre 50 y 90 m/min, por ser el parámetro que más afecta.

Como se puede observar en la *figura 3.1* las fuerzas de corte disminuyen con el aumento de la velocidad de corte hasta un valor mínimo, y desde este punto se produce un incremento con la velocidad de corte, especialmente en el caso de las fuerzas de avance específicas *figura 3.2*. Este valor mínimo de las fuerzas de corte se encuentra en un intervalo de 70-90 m/min. Estos resultados no están de acuerdo con los resultados obtenidos por Fang y Wu [3], Cotterell y Byrne [22] y Gente y Hoffmeister [2] ya comentados anteriormente.

Por último cabe destacar que, tras la realización de los experimentos, observaron bandas de corte adiabáticas para todas las condiciones de corte, lo cual es una característica típica en el mecanizado de las aleaciones de titanio.

#### **FRECUENCIA DE SEGMENTACIÓN DE VIRUTA EXPERIMENTAL:**

En la *figura 3.3* hemos recopilado los resultados experimentales de la frecuencia de segmentación de la viruta con relación a la velocidad de corte obtenidos en [26] y [22]. Como se puede observar en la *figura 3.3* la frecuencia presenta una tendencia lineal con la velocidad de corte, representado en escala logarítmica, lo que quiere decir que, al aumentar la velocidad de corte también va a aumentar el valor de la frecuencia de segmentación.

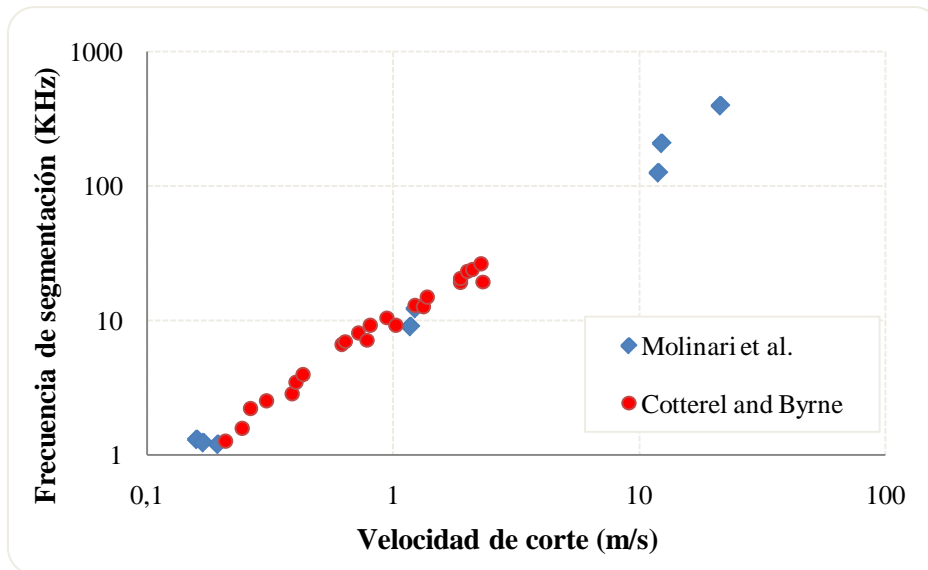


Figura 3.3.- Comparación de las frecuencia de segmentación vs velocidad de corte de los experimentos realizados por Molinari et al. [26] y Cotterell y Byrne [22].

#### ANCHO DE BANDA EXPERIMENTAL:

En la figura 3.4 mostramos cuáles fueron los anchos de banda que obtuvo en sus experimentos para diversas velocidades de corte Molinari et al. [26], observándose una clara disminución a medida que aumenta la velocidad de corte.

El artículo de Molinari et al. es el único del que disponemos para realizar posteriormente una comparación con los resultados obtenidos para nuestro modelo, ya que el resto de autores no han estudiado su comportamiento.

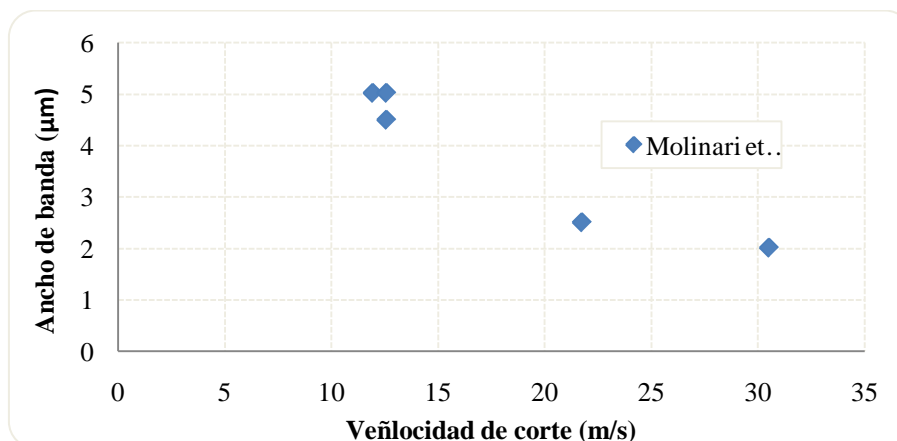
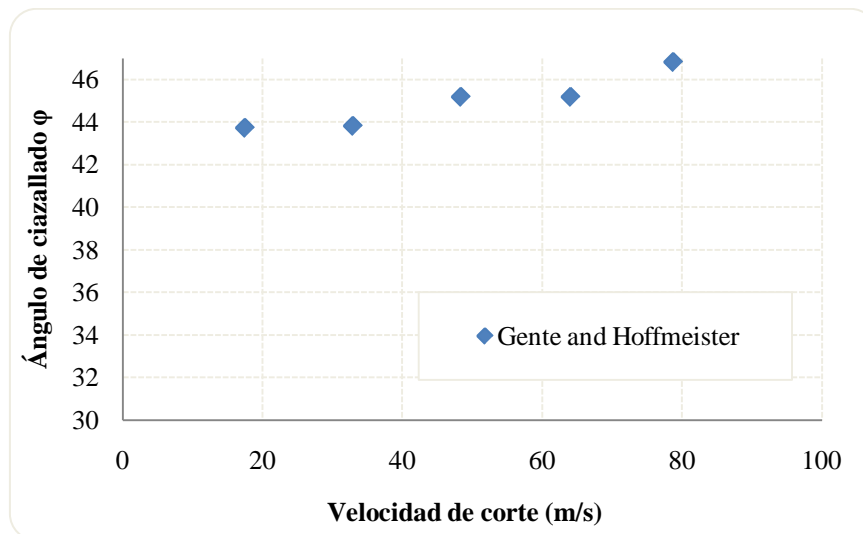


Figura 3.4.- Ancho de banda en función de la velocidad de corte para la aleación de  $Ti_6Al_4V$  del estudio realizado por Molinari et al. [26].



### ÁNGULO DE CIZALLADO EXPERIMENTAL:

En la *figura 3.5* hemos representado los resultados obtenidos por Gente y Hoffmeister [2] de los ángulos de cizallado con respecto a la velocidad de corte. Como se puede observar, al aumentar la velocidad de corte aumenta ligeramente el valor del ángulo de cizallado.



*Figura 3.5.- Ángulo de cizallado obtenido por Gente y Hoffmeister (2001) [2].*



## Capítulo IV

### 4.- MODELO NUMÉRICO.

En este cuarto capítulo vamos a definir el modelo numérico utilizado para las simulaciones, destacando que el método que se ha utilizado es el de los elementos finitos (MEF), utilizando unos parámetros fijos para todas las simulaciones y variando otros parámetros para cada simulación. También se van a mencionar cuales son las características de nuestro modelo y cuál es la ecuación constitutiva del material que hemos utilizado. Por último se mencionarán cuales son los parámetros que se han analizado para realizar el presente proyecto.

#### 4.1.- CARACTERÍSTICAS DEL MODELO.

##### a) MALLADO DEL MODELO.

Para la realización de este proyecto se ha elaborado un modelo de deformación plana (2D) a partir del código comercial ABAQUS / Explicit, y utilizando formulación Lagrangiana.

La geometría básica y las dimensiones del modelo numérico se muestran en la *figura 4.1*. La herramienta se fija en el punto más bajo del contorno y se le aplica la velocidad a dicha herramienta. El corte se ha llevado a cabo bajo condiciones de tensión plana y la Discretización se ha hecho con malla estructurada con elementos CPE4RT, donde cada variable tiene el siguiente significado:

- C: elemento cuadrado,
- 4: cada elemento tiene cuatro nodos,
- R: tiene una interpolación en el centro del elemento,
- T: utiliza la temperatura como variable.

La malla de nuestra pieza de trabajo se ha dividido en tres zonas distintas. La zona A corresponde a la viruta sin cortar y tiene un espesor de 0.1 mm (que corresponde



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

a el avance), la zona B es una zona intermedia de 2  $\mu\text{m}$  de espesor, y la zona C que corresponde con la superficie mecanizada de la pieza tiene un espesor de 0.098 mm. La malla de las zonas B y C está formada por rectas paralelas a la dirección horizontal y vertical, mientras que la zona A se ha mallado con un cierto ángulo  $\theta$  de inclinación con la dirección horizontal. El objetivo que tiene esta geometría de la malla es el facilitar la formación de viruta segmentada, que es característico del mecanizado a alta velocidad del Ti y aleaciones que contienen níquel como el Inconel 718 [29].

El tamaño del elemento es de 2  $\mu\text{m}$  y el ángulo  $\theta$  es igual a 40°. También se han realizado algunos estudios con un tamaño del elemento de 1  $\mu\text{m}$  y con el mismo ángulo  $\theta$ , para poder comparar resultados con los de la malla de 2  $\mu\text{m}$ . En trabajos anteriores [27], [28] y [29], se mostró la capacidad de la configuración de la malla para reproducir el fenómeno de localización asociado a la generación de viruta segmentada (figura 4.2).

El criterio de rotura que se ha implementado en el modelo impone que dos elementos se separan en sus nodos si se alcanza un determinado valor de deformación de cizalladura  $\varepsilon_p^{crit}$ . Dependiendo de la zona en la que nos encontremos el valor de esa deformación crítica varía. En nuestro modelo hemos supuesto que el nivel de  $\varepsilon_p^{crit}$  para la zona A (viruta) es de 4.5, en la zona B (interfase viruta-pieza) es 2 y en la zona C (pieza base) es 3. Dichas características geométricas y numéricas del modelo permiten la simulación de corte ortogonal en el rango de velocidades estudiadas evitando distorsiones excesivas de la malla que provocarían que se detenga el cálculo.

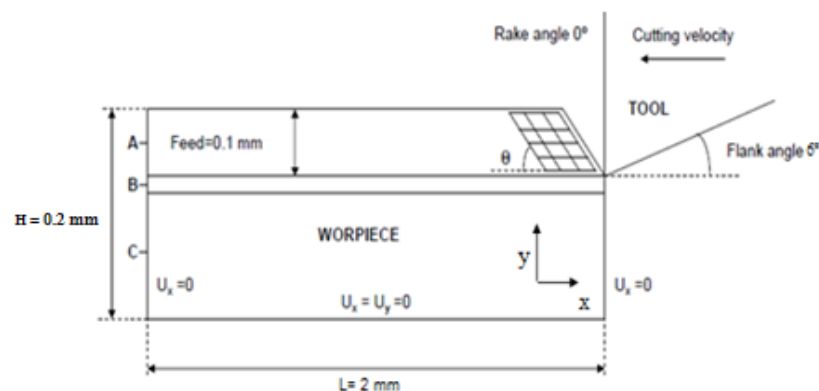


Figura 4.1.- Esquema del modelo numérico.



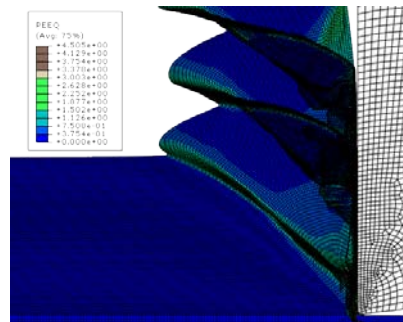


Figura 4.2.- Contorno de tensiones obtenidas durante la formación de viruta segmentada.

La principal dificultad para definir el mallado de un problema de corte ortogonal mediante modelización numérica está en encontrar un equilibrio entre el tamaño de los elementos más pequeños del mallado y el tiempo de cálculo que implica utilizar ese tamaño de malla, ya que en los modelos con integración explícita, el incremento de tiempo de integración es inversamente proporcional al tamaño característico del elemento más pequeño de la malla. Es decir, si disminuye el tamaño de la malla aumenta el tiempo de cálculo.

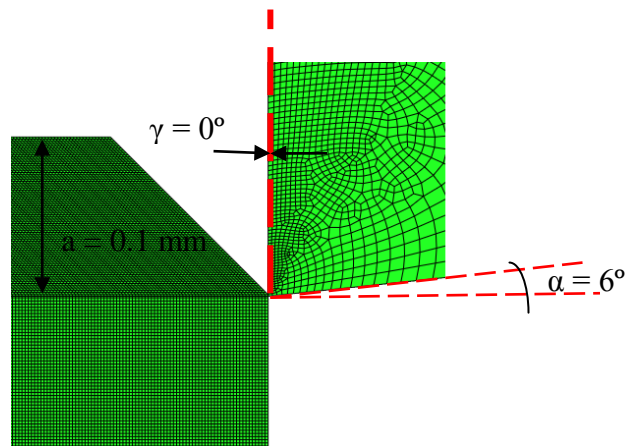
Para la realización del proyecto, y utilizando estos dos tipos de malla ( $1\ \mu\text{m}$  y  $2\ \mu\text{m}$ ), hemos comprobado que con un ordenador básico de cálculo como el utilizado, se pueden lanzar tres simulaciones a la vez como máximo, obteniendo unos tiempos de cálculo distintos para cada tipo de malla.

Como ya se ha comentado, al disminuir el tamaño de la malla aumenta el tiempo de cálculo y además el tiempo de cálculo también va a depender de la velocidad utilizada para la simulación. Por tanto, para las simulaciones de malla  $1\ \mu\text{m}$  los tiempos de cálculo han oscilado entre 9 y 11 días (para los casos de velocidades pequeñas) y entre 6 y 7 días (para velocidades altas). Por el contrario para las simulaciones de malla  $2\ \mu\text{m}$  los tiempos de cálculo han oscilado entre 6 y 7 días (para velocidades pequeñas) y entre 4 y 5 días (para velocidades altas). Estos tiempos han oscilado en algunos de los casos a lo alto o a lo bajo, pero se mantenía esa duración en la mayoría de los casos.



b) **ÁNGULOS DE LA HERRAMIENTA Y GEOMETRÍA DEL CORTE.**

En la *figura 4.3* se muestran cuáles son los ángulos que se le han proporcionado a la herramienta de corte y cuál es la geometría de corte. El avance es  $a = 0.1$  mm, el ángulo de desprendimiento  $\gamma = 0^\circ$  y al ángulo de incidencia  $\alpha = 6^\circ$ , siendo todos estos valores constantes en todas las simulaciones. Se han elegido estos parámetros para poder comparar los resultados con los de la literatura y así validar nuestro modelo.



*Figura 4.3.- Ángulos y geometría del proceso.*

c) **PARÁMETROS DE CORTE: velocidad de corte, tiempo de corte, fricción y condiciones de contorno.**

Las condiciones de contorno que se han utilizado para realizar el modelo son las que se indican en la *figura 4.1*. En la base de la pieza a mecanizar, se han restringido tanto el movimiento vertical como el horizontal, y las reacciones en dirección X son nulas. En los laterales el desplazamiento horizontal es cero y la superficie superior (material que se convertirá en viruta) está libre. Por último recordamos que la herramienta se supone como un elemento rígido que no sufre deformación alguna.

Para la realización de nuestro modelo ha sido necesario introducir una serie de valores característicos, unos de ellos han permanecido constantes para todas las simulaciones mientras que a otros parámetros se les ha dado diversos valores, para ver qué influencia tienen sobre otras variables, como:



• **las propiedades del material y de la herramienta:** en la tabla 4.1 se muestran los valores de algunas de las propiedades utilizadas para la realización del modelo, las cuales han permanecido invariables para todos los casos estudiados.

Tabla 4.1.- Propiedades del material y de la herramienta.

Propiedad	Material	Herramienta
Conductividad (W/m·K)	7.2	33.5
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	4420	12700
Elasticidad	E = 1.14·10 <sup>5</sup> MPa $\mu = 0.33$	E = 5·10 <sup>5</sup> MPa $\mu = 0.3$
Calor específico (J/kg·°C)	560	234
Expansión	9.2·10 <sup>-6</sup>	-

• **la velocidad de corte:** se han utilizado los valores de 1 m/s (60 m/min), 2 m/s (120 m/min), 4 m/s (240 m/min), 6 m/s (360 m/min), 10 m/s (600 m/min), 20 m/s (1200 m/min) y 25 m/s (1500 m/min). Todos estos valores se introducen con valor negativo en el INP, ya que el sentido es negativo son respecto al sistema de ejes coordenados. Se han realizado varios estudios a distintas velocidades, con el fin de ver qué influencia tiene la velocidad sobre otras variables como la formación de viruta, las fuerzas de corte y el ancho de banda entre otras.

• **el tiempo de corte:** este valor depende de la velocidad con la que se realice el proceso y de la distancia que se mecanice, que en nuestro caso la longitud máxima que se puede mecanizar es de 0.002 m. Por lo tanto para saber qué tiempo le corresponde a cada velocidad de corte hay que utilizar la siguiente ecuación:

$$t = \frac{0.002 \text{ m}}{V_c \text{ (m/s)}} \text{ [s]}$$

• **la fricción:** hemos dado distintos valores a la fricción entre la superficie de la herramienta y la viruta, para ver qué influencia tiene sobre parámetros como las fuerzas de corte, el ancho de banda o la morfología de la viruta entre otros.



Se han realizado dos tipos de estudios relacionados con la fricción, uno de ellos variando el valor de la fricción con la velocidad de corte, es decir,  $\mu = f(v)$  y el otro tipo de estudio manteniendo la fricción constante para distintas velocidades de corte. Para la realización de este segundo tipo de estudios se han utilizado fricciones de valores  $\mu = 0.1$ ,  $\mu = 0.4$  y  $\mu = 0.8$ .

#### **4.2.- ECUACIÓN CONSTITUTIVA DEL MATERIAL.**

Para nuestro modelo, el material de la pieza es considerado como medio continuo homogéneo, es decir, se supone que las propiedades mecánicas son idénticas en todos los puntos. Además se supone que la herramienta es rígida. A su vez el material de la pieza se supone que es elástico-viscoplástico, isotrópico, y que obedece la teoría de flujo  $J_2$  (basada en la función de Von Mises).

La *ecuación constitutiva* utilizada para simular el comportamiento del material a altas velocidades es la ecuación de Johnson-Cook, ver la ecuación de más abajo. Esta ecuación viene definida e implementada en ABAQUS y es una expresión empírica que relaciona la tensión efectiva  $\sigma$  (tensión de Von Mises) con la deformación efectiva  $\epsilon$ .

El modelo de Johnson-Cook es probablemente el modelo termoviscoplástico más extendido en la actualidad entre los códigos de simulación numérica por elementos finitos. Se suele emplear con éxito en problemas que están sometidos a altas velocidades de deformación como impactos balísticos, mecanizado y conformado rápido.

Los parámetros utilizados en la ecuación constitutiva para la aleación de Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V se han obtenido de la literatura científica y se muestran en la *tabla 4.2* [25].

- ***Ecuación constitutiva de Johnson - Cook y sus parámetros:***

$$\sigma = [A + B(\epsilon)^n] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right]$$



Tabla 4.2.- Parámetros de la ecuación constitutiva para el  $Ti_6Al_4V$ .

	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m	$\dot{\epsilon}_0$ (1/s)
$Ti_6Al_4V$	782	498	0.028	0.28	1.0	$10^{-5}$

Los valores de temperatura de fusión y temperatura ambiente que se han utilizado a lo largo de todas las simulaciones son:  $T_{melt} = 1793$  K y  $T_0 = 293$  K.

### 4.3.- DESCRIPCIÓN DE LAS SIMULACIONES Y PARÁMETROS A ANALIZAR.

Para la realización de este proyecto, ha tenido un gran peso el trabajo experimental y analítico llevado a cabo mediante el MEF. A continuación se van a exponer cuáles son las características de las diferentes simulaciones, realizadas a partir del modelo inicial que se ha definido anteriormente.

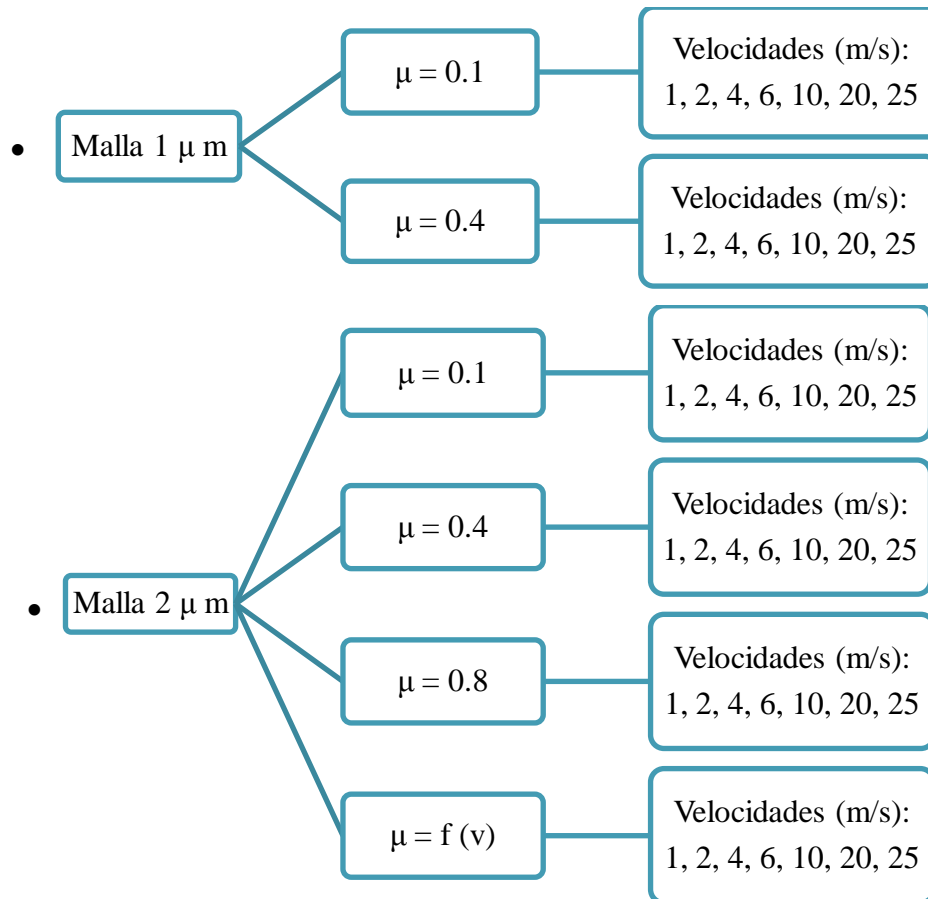
Hay que destacar, que dichas simulaciones han implicado grandes volúmenes de información, ya que se han estudiado varios casos con diferentes parámetros, e incluso en ocasiones se han tenido que repetir muchos de estos casos ya que los resultados obtenidos no eran los esperados. Esto ha supuesto gran parte del tiempo empleado en la elaboración del proyecto, siguiendo para ello una metodología bastante organizada.

Una vez iniciadas las simulaciones, estas se han considerado válidas cuando el proceso era estacionario o cuando el proceso comenzada a ser repetitivo, para así ahorrar tiempo de cálculo y no mecanizar la pieza hasta el final. Destacar que algunos de los casos han abortado antes de tiempo debido a que existía una gran distorsión en las soluciones y por ello dichos resultados no son del todo satisfactorios.

Por tanto las simulaciones que se han realizado en este proyecto, y sobre las cuáles se hablará más adelante son 42 en total. Se han utilizado dos tipos de malla distintas, para cada tipo de malla distintas fricciones y para cada fricción se han utilizado las mismas velocidades en todos los casos. A continuación mostramos un breve esquema de las simulaciones realizadas:



Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del  $Ti_6Al_4V$



De todas las simulaciones realizadas se han extraído los mismos resultados, y estos son los siguientes:

- la morfología de la viruta generada,
- gráfica de las fuerzas de corte en función del tiempo de corte y su valor,
- gráfica de las fuerzas de avance en función del tiempo de corte y su valor,
- los tiempos de aparición de la banda de cizalladura primaria para así calcular la frecuencia de aparición de dicha banda,
- ancho de banda aproximado medido sobre un *path*, el cual se explicará más adelante como se ha calculado,
- el ángulo de cizallado (este valor sólo se ha calculado para algunas de las simulaciones, no para todas).

Se extraen los mismos resultados para todas las simulaciones para así poder determinar qué influencia tiene el tamaño del elemento de malla, la fricción y la velocidad de corte sobre cada uno de ellos.



## Capítulo V

### 5.- VALIDACIÓN Y RESULTADOS.

En este capítulo vamos a mostrar todos los resultados obtenidos y los vamos a comparar con los de la literatura para proceder a la validación de nuestro modelo. También se analizarán los resultados obtenidos en profundidad para ver qué influencia tienen unos sobre otros y se realizará una comparación entre la aleación de titanio Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V y el Inconel 718.

#### 5.1.- VALIDACIÓN.

Para realizar la validación de nuestro modelo vamos a proceder a hacer una comparación de los resultados obtenidos a partir de nuestras simulaciones y de los obtenidos experimentalmente por: [2], [3], [22], [23], [24] y [26]. La comparación se va a realizar entre las presiones específicas de corte y de avance en función de la velocidad de corte empleada.

Tanto la presión específica de corte como la presión específica de avance, se obtienen dividiendo las correspondientes fuerzas de corte y avance entre el avance y la profundidad de cada experimento, obteniéndose por tanto unidades de N/mm<sup>2</sup>. En nuestro caso hemos tenido que dividir las fuerzas de corte y avance obtenidas entre el avances  $a = 0,1$  mm y la profundidad  $p = 1$  mm, para poder comparar nuestros resultados con los experimentales. Más adelante realizaremos un análisis exclusivo de las fuerzas obtenidas para nuestro modelo, para ver qué factores influyen en ellas.

De entre todas las simulaciones realizadas para nuestro modelo sólo hemos escogido dos de ellas para compararlas con los resultados experimentales, ya que si representáramos en un mismo gráfico nuestras 6 simulaciones y las 7 correspondientes a los estudios experimentales no se apreciaría bien la representación por existir demasiados puntos. Las dos simulaciones escogidas de nuestro modelo son para la malla de tamaño 2 micras y fricciones  $\mu = 0,4$  y  $\mu = f(v)$ .



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

En la *figura 5.1* hemos representado los resultados correspondientes a las presiones específicas de corte experimentales y numéricas y en la *figura 5.2* los resultados de las presiones específicas de avance.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, tanto las fuerzas de corte como las de avance presentan un descenso brusco para velocidades entre 0,01 y 3 m/s aproximadamente, seguidas de una estabilización para altas velocidades, como se observa en la *figuras 5.1* y *5.2*. Destacar que la segunda gráfica de la *figura 5.1* es un zoom de la parte en la que se produce el cambio brusco de dichas fuerzas. Este descenso puede ser debido a la reducción del coeficiente de fricción existente entre la viruta y la herramienta de corte, al aumentar la velocidad de corte.

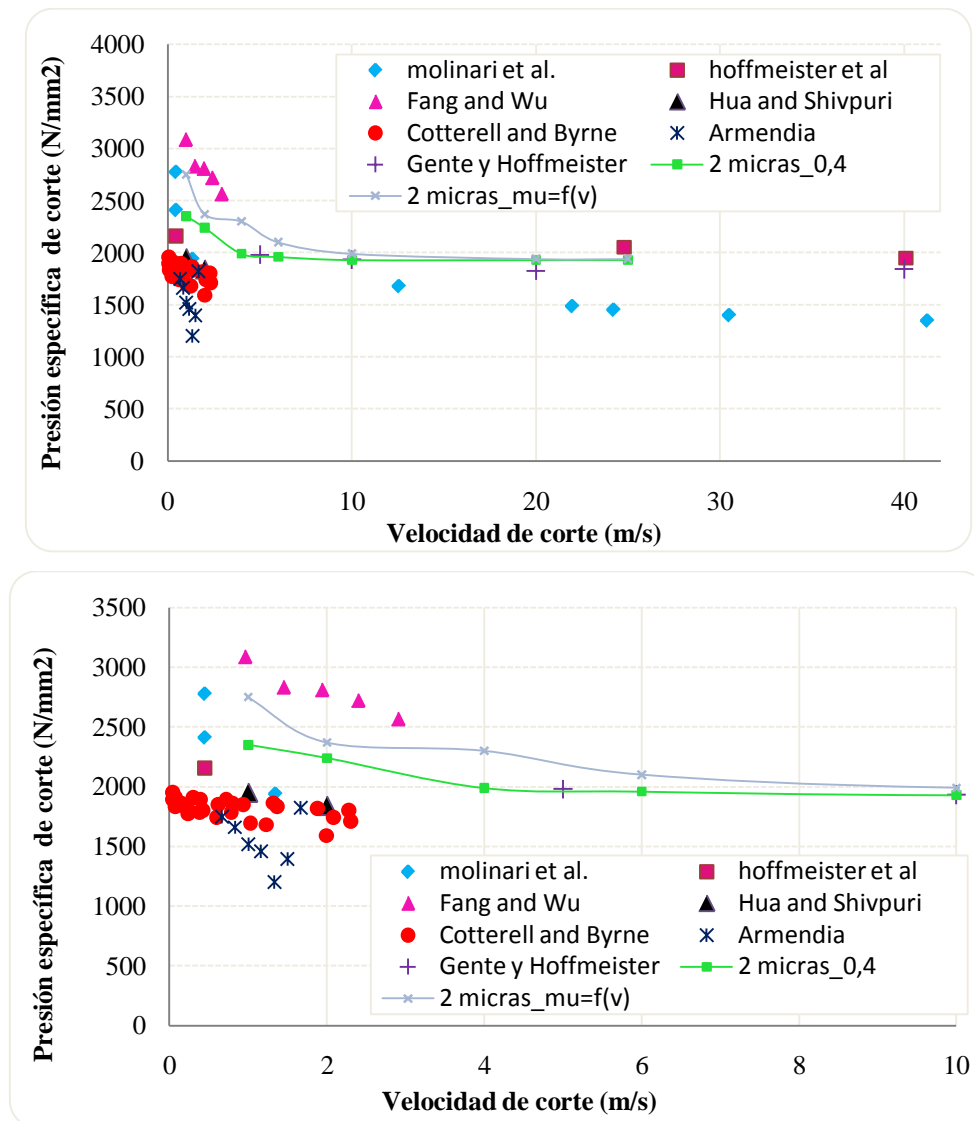


Figura 5.1.- Presiones específicas de corte experimentales y numéricas.



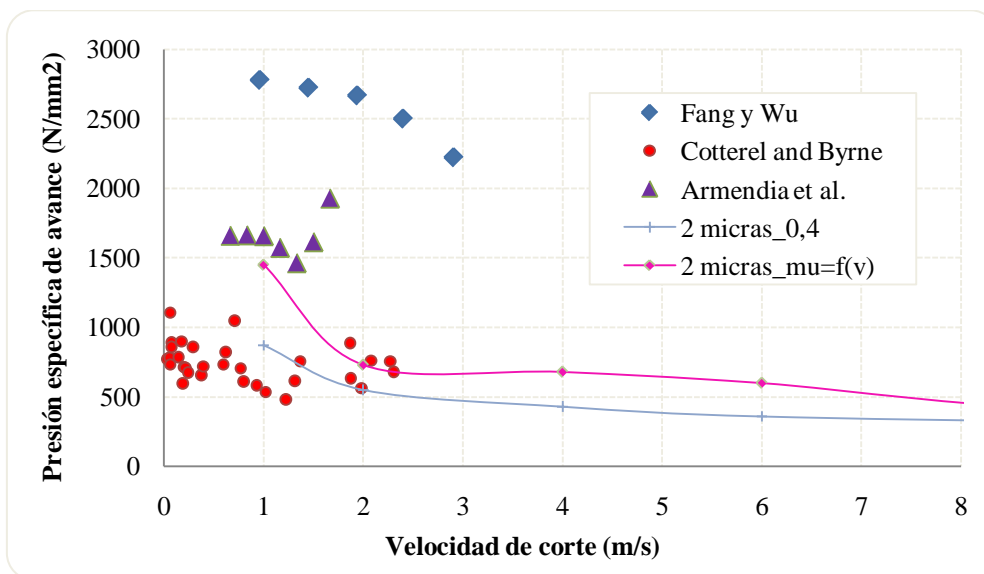


Figura 5.2.- Presiones específicas de avance experimentales y numéricas.

Como se puede apreciar, existen ciertas diferencias entre todos los resultados, pero esto es debido a que no todos los ensayos experimentales se han realizado bajo las mismas condiciones de corte (ángulo de desprendimiento, avance, etc.) y a que no todas las aleaciones de  $Ti_6Al_4V$  mecanizadas presentan el mismo tratamiento térmico superficial ni han sido mecanizadas con el mismo tipo de herramienta. No obstante todos los resultados presentan la misma tendencia y son muy similares los unos a los otros, por ello podemos concluir que, el método de elementos finitos empleado en nuestro modelo puede simular el proceso de corte ortogonal y predecir resultados reales con una precisión bastante buena. Por tanto, la precisión en la predicción de las fuerzas de corte y avance hacen que nuestro modelo numérico quede validado y el comportamiento del material sea adecuado.

En el siguiente punto vamos a realizar un análisis más detallado de los resultados obtenidos. Vamos a hablar de las fuerzas de corte y de avance, de la frecuencia de segmentación, del ancho de banda, del ángulo de cizallado y de la morfología de la viruta. Vamos a analizar qué influencia tiene la velocidad de corte, el coeficiente de fricción o el tamaño de la malla sobre los parámetros que acabamos de mencionar.



## **5.2.-RESULTADOS.**

Como ya hemos mencionado, en este apartado vamos a explicar cuál es la influencia de la velocidad de corte, la fricción o el tamaño de malla (las cuales podríamos considerar variables independientes) sobre variables como: las fuerzas de corte y de avance, la frecuencia de segmentación, el ancho de banda, el ángulo de cizallado y la morfología de viruta (las cuales podríamos considerar variables dependientes). También vamos a explicar cómo se ha calculado cada uno de los resultados y que procedimiento se ha seguido para ello.

### ***5.2.1.- Estudio de las fuerzas de corte y de las fuerzas de avance.***

Los resultados obtenidos tanto para las fuerzas de corte como para las fuerzas de avance se han calculado a partir de unas gráficas proporcionadas por el programa ABAQUS, las cuales vamos a mostrar más adelante y vamos a explicar que procedimiento hemos seguido para calcular dichas fuerzas.

Como ya se ha comentado anteriormente, se han realizado un total 42 simulaciones, variando diversos factores como: el tamaño de la malla (malla de 1  $\mu$  m y malla de 2  $\mu$  m), el coeficiente de fricción existente entre la pieza a mecanizar y la herramienta ( $\mu = 0,1$ ;  $\mu = 0,4$ ;  $\mu = 0,8$  y  $\mu = f(v)$ ) y la velocidad de corte (utilizando valores de 1, 2, 4, 6, 10, 20 y 25 m/s). Por tanto, a partir de las tablas de datos y de las gráficas que se muestran más adelante, vamos a determinar qué influencia tienen las variables independientes (tamaño de la malla, fricción y velocidad de corte) sobre las dependientes (fuerzas de corte y de avance, frecuencia de segmentación, ancho de banda, ángulo de cizallado y morfología de viruta).

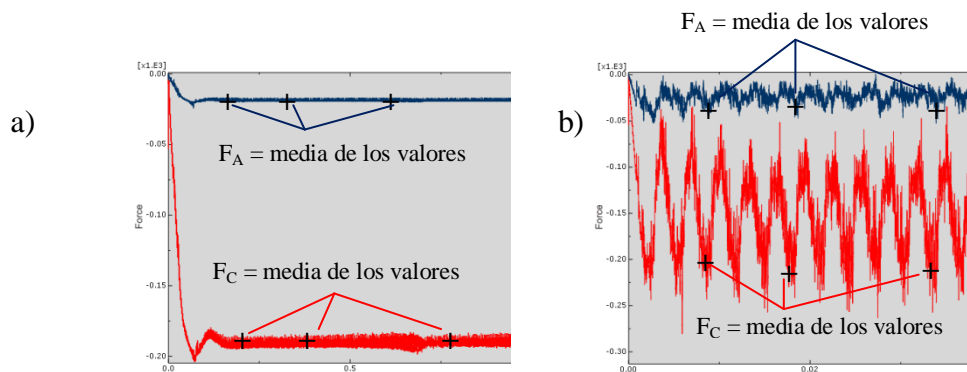
A continuación mostramos las gráficas proporcionadas por ABAQUS para una de las simulaciones realizadas (ya que para el resto de simulaciones se han obtenido curvas similares), con las que hemos calculado tanto las fuerzas de corte como las fuerzas de avance. Estas gráficas representan el valor de las fuerzas en función del tiempo. Como se puede apreciar en la *figura 5.3*, existen dos curvas de distintos colores,



una de color rojo que es la fuerza de corte y otra de color azul que es la correspondiente a la fuerza de avance.

Las curvas que proporciona el programa, como se puede observar en la *figura 5.3*, se encuentran en la parte negativa del eje de ordenadas, lo cual significaría que las fuerzas obtenidas serían negativas, pero esto es debido a la colocación de los ejes del sistema de referencia que utiliza el propio programa en relación a la dirección del mecanizado. Para calcular los valores de las fuerzas reales, hay que suponer que las gráficas son simétricas a las anteriores con respecto al eje de abscisas para así obtener fuerzas con valores positivos.

Hemos encontrado dos tipos de gráficas diferentes, una en la que la fuerza alcanzaba un valor estacionario (principalmente para bajas velocidades) y otra en la que la curva se repetía continuamente variando bruscamente de valor (para altas velocidades). Para el primer tipo de gráficas el valor que hemos elegido como válido es dicho valor estacionario (ver *figura 5.3.a*) y para el segundo tipo de gráficas hemos cogido el máximo valor (ver *figura 5.3.b*). Para todas las simulaciones se han escogido varios valores de ambas fuerzas y posteriormente se ha realizado una media entre todos los valores para así obtener un valor más preciso.



*Figura 5.3.- Método de obtención de las fuerzas de corte y avance para a) bajas velocidades y b) altas velocidades.*

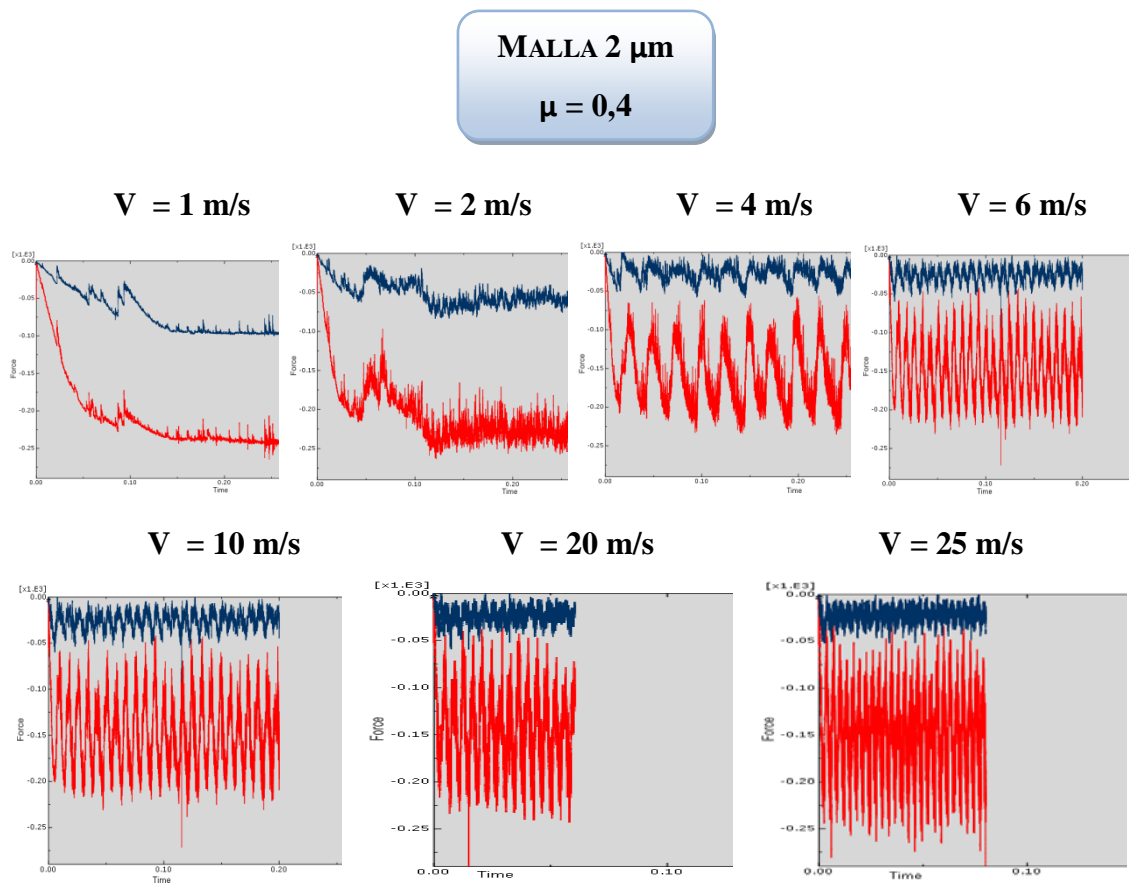
En la *figura 5.3 a)* observamos un primer pico más alto que el resto, lo que significa que es en ese momento cuando se produce la primera banda de cizallado. Seguidamente disminuye el valor de las fuerzas alcanzándose un valor estacionario que es el que nos indica que la viruta va a ser continua. Por el contrario, en la *figura 5.3 b)*



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

observamos cómo se repite continuamente el mismo patrón, el cual nos indica que en cada pico máximo se produce una nueva segmentación de viruta, o lo que es lo mismo, esto nos indica que la viruta va a ser discontinua o segmentada. Más adelante explicaremos la relación existente entre la fuerza de corte y la morfología de la viruta.

En la *figura 5.4* se muestran las gráficas de las fuerzas de corte y avance en función del tiempo obtenidas para la simulación correspondiente a la malla de  $2\ \mu\text{m}$  y  $\mu = 0,4$ . Las gráficas obtenidas para el resto de simulaciones son prácticamente iguales, por ello solo mostramos las de uno de los casos como ejemplo.



*Figura 5.4 .- Fuerzas de corte y de avance para la malla  $2\ \mu\text{m}$  y  $\mu = 0,4$ .*

Como puede observarse en la *figura 5.4* y como ya se ha mencionado anteriormente, para velocidades altas la gráfica presenta muchas más oscilaciones y esto es debido a que al aumentar la velocidad de corte aumenta el número de segmentaciones, lo cual nos indica que vamos a tener una viruta segmentada.



Los resultados obtenidos para cada una de las simulaciones los hemos recopilado en la *tabla 5.1* (valores de las fuerzas de corte) y en la *tabla 5.2* (valores de las fuerzas de avance). A partir de dichas tablas y de las figuras que se muestran a continuación, vamos a explicar que influencia tienen los parámetros independientes sobre la fuerza de corte y sobre la fuerza de avance.

*Tabla 5.1.- Resultados de las fuerzas de corte obtenidos numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$ .*

FUERZA DE CORTE (N)							
Velocidad (m/s)	Malla 1 $\mu m$		Malla 2 $\mu m$				
	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,8$	$\mu = f(v)$	
1	200	236	202	235	275	( $\mu = 0,7$ )	275
2	200	232	200	224	252	( $\mu = 0,6$ )	237
4	198	206	196	199	242	( $\mu = 0,5$ )	230
6	195	196	189	196	220	( $\mu = 0,4$ )	210
10	189	190	188	193	205	( $\mu = 0,3$ )	199
20	186	188	188	193	198	( $\mu = 0,2$ )	194
25	185	187	188	193	185	( $\mu = 0,15$ )	194

*Tabla 5.2.- Resultados de las fuerzas de avance obtenidos numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$ .*

FUERZA DE AVANCE (N)							
Velocidad (m/s)	Malla 1 $\mu m$		Malla 2 $\mu m$				
	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,8$	$\mu = f(v)$	
1	18	81	21	87	145	( $\mu = 0,7$ )	145
2	20	68	22	55	100	( $\mu = 0,6$ )	73
4	19	40	21	43	79	( $\mu = 0,5$ )	68
6	18	33	20	36	60	( $\mu = 0,4$ )	60
10	18	29	20	32	54	( $\mu = 0,3$ )	38
20	18	23	20	30	43	( $\mu = 0,2$ )	35
25	16	23	20	30	33	( $\mu = 0,15$ )	35

A partir de los datos recogidos en ambas tablas, vamos a proceder a representar los valores de las fuerzas de corte y de avance con respecto a la velocidad de corte.



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

Vamos a representar las fuerzas de corte y avance de las simulaciones realizadas con fricciones de  $\mu = 0,1$  y  $\mu = 0,4$  para los dos tamaños de malla (figura 5.5). Esto nos va a servir para poder estudiar la influencia del tamaño de malla sobre las fuerzas de corte y avance.

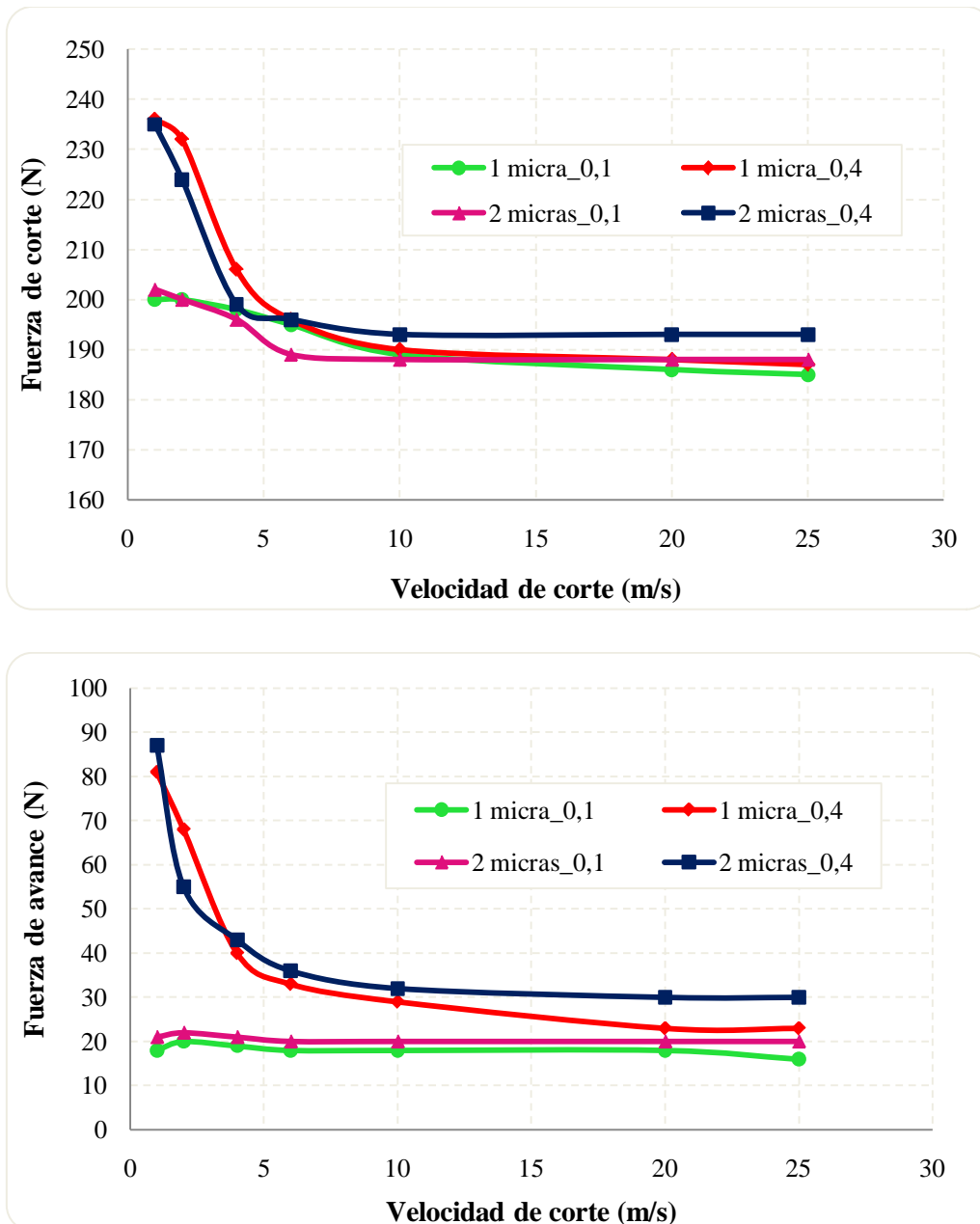


Figura 5.5.- Representación de las fuerzas de corte y avance obtenidas para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con respecto a la velocidad de corte y para  $\mu = 0,1$  y  $\mu = 0,4$ .

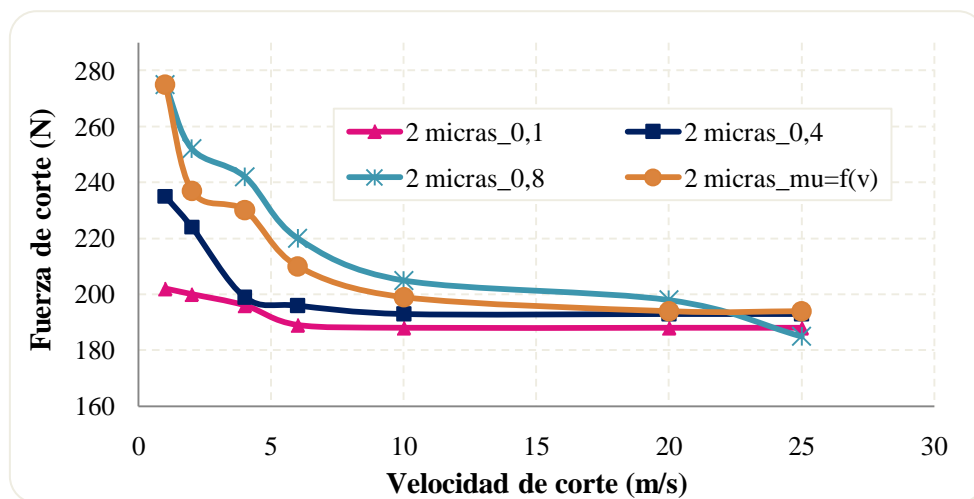


**Influencia del tamaño de la malla sobre la frecuencia de segmentación:**

Observando los resultados obtenidos en las *tablas 5.1 y 5.2*, y ayudándonos de la *figura 5.5*, vemos que los resultados numérico y las curvas representadas son prácticamente iguales para ambas mallas sin existir a penas diferencias, con lo que podemos concluir que el tamaño de la malla es un factor que no influye ni en las fuerzas de corte ni en las fuerzas de avance.

Por lo tanto, para estudiar la influencia de la velocidad de corte y del coeficiente de fricción sobre las velocidades de corte y avance, podemos hacerlo únicamente para la malla de tamaño  $2 \mu m$ , ya que así ahorramos tiempo de cálculo y también porque disponemos de mayor cantidad de resultados para distintos coeficientes de fricción.

En las *figuras 5.6 y 5.7* hemos representado los valores de las fuerzas de corte y avance respectivamente, en función de la velocidad de corte para la malla de tamaño  $2 \mu m$ . A partir de estas figuras vamos a estudiar la influencia de la velocidad de corte y del coeficiente de fricción.



*Figura 5.6.- Fuerzas de corte obtenidas numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con respecto a la velocidad de corte para la malla de  $2 \mu m$ .*

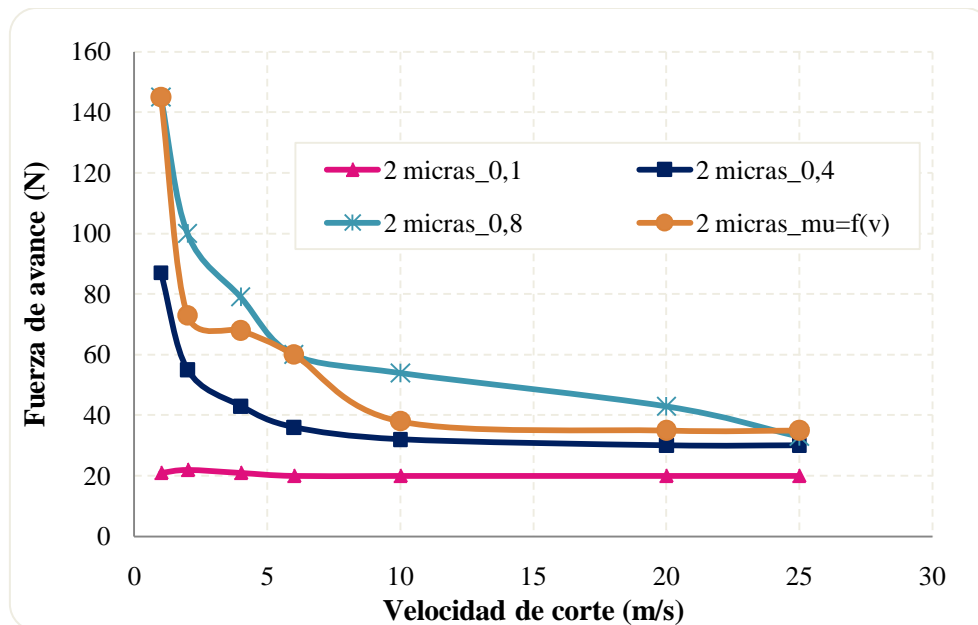


Figura 5.7.- Fuerzas de avance obtenidas numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con respecto a la velocidad de corte para la malla de  $2\ \mu m$ .

#### Influencia de la velocidad sobre las fuerzas de corte y avance:

Como se puede observar a partir de la *figura 5.6* y *5.7*, para bajas velocidades (1, 2, 4 y 6 m/s) ambas fuerzas disminuyen bruscamente hasta alcanzar un valor que se va a mantener constante para el resto de velocidades de corte (10, 20 y 25 m/s) y cuyo valor está en torno a los 190 N para la fuerza de corte y en torno a los 30 N para la fuerza de avance. También se aprecia como las fuerzas de corte son mucho mayores que las de avance.

La razón por la que las fuerzas disminuyen hasta un mínimo para un determinado coeficiente de fricción al aumentar la velocidad de corte se debe a que, al aumentar la velocidad de corte se produce un aumento de la temperatura en la zona de corte y por lo tanto un ablandamiento del material, lo cual va a provocar que las fuerzas necesarias para el mecanizado de nuestra pieza sean menores para altas velocidades.





También es importante destacar que a partir de una velocidad de corte de 10 m/s aproximadamente, las fuerzas ya no van a disminuir más y se va a mantener constante de ahí en adelante (se ha alcanzado el valor mínimo), y esto es debido a que se produce saturación del material, lo cual significa que llega un momento en el que la temperatura en la zona de corte del material va a ser la misma independientemente de la velocidad de corte empleada y por lo tanto las fuerzas necesaria para su mecanizado no van a variar y van a permanecer constantes. En el caso de fricción  $\mu = 0,8$  se aprecia como dicha saturación se alcanza a partir de una velocidad de 20 m/s.

**Influencia del coeficiente de fricción sobre las fuerzas de corte y avance:**

Dependiendo del coeficiente de fricción que exista entre la herramienta y la superficie a mecanizar, las fuerzas van a variar. Para velocidades de corte mayores o iguales a 6 m/s se observa como el coeficiente de fricción apenas tiene influencia sobre las fuerzas ya que éstas a penas varían y la razón es la que hemos explicado anteriormente. El aumento de velocidad va a provocar un aumento de temperatura y a su vez un ablandamiento del material que provoca una disminución en las fuerzas. Por tanto, a altas velocidades de corte prevalece el efecto de la velocidad sobre el de la fricción.

Para velocidades de corte menores que 6 m/s el efecto de la fricción es mucho más visible, ya que al aumentar el valor del coeficiente de fricción entre la herramienta y la pieza para una misma velocidad de corte, va a aumentar el rozamiento y por tanto se van a necesitar fuerzas mayores.

Por tanto, podemos concluir que un aumento del coeficiente de fricción supone mayores valores de las fuerzas necesarias para el mecanizado del material.



**COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE SALIDA.**

Un parámetro que está relacionado tanto con la fuerza de corte como con la fuerza de avance es el coeficiente de fricción de salida  $\mu_{salida} = \frac{F_A}{F_C}$ . En este apartado hemos calculado dichos valores y los hemos comparado con los correspondientes valores de entrada, obteniendo los resultados mostrados en la *tabla 5.3*.

*Tabla 5.3.- Coeficientes de fricción de salida obtenidos para nuestro modelo.*

COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE SALIDA						
Velocidad (m/s)	Malla 2 $\mu\text{m}$					
	$\mu_{entrada}$	$\mu_{salida}$	$\mu_{entrada}$	$\mu_{salida}$	$\mu_{entrada}$	$\mu_{salida}$
1	0,1	0,1	0,4	0,37	0,8	0,53
2		0,1		0,24		0,39
4		0,1		0,22		0,33
6		0,1		0,18		0,27
10		0,1		0,16		0,26
20		0,1		0,15		0,22
25		0,1		0,15		0,18

A la vista de los resultados obtenidos en la *tabla 5.3* podemos comentar que:

- si  $\mu_{entrada} = 0,1$ , se obtiene un coeficiente de fricción de salida de  $\mu_{salida} = 0,1$  independientemente de la velocidad de corte utilizada.
- si  $\mu_{entrada} = 0,4$  ó  $0,8$ , observamos como para velocidades bajas el coeficiente de fricción de salida es próximo al valor del de entrada, mientras que para velocidades altas el coeficiente de fricción de salida disminuye bastante y tiende a alcanzar un valor estable a medida que se alcanzan velocidades más altas.



Para justificar los resultados obtenidos acerca del coeficiente de fricción de salida vamos a proceder a la siguiente explicación:

De acuerdo con el modelo de fricción de Coulomb implementado en el modelo numérico, la tensión de fricción en la interfase se define por la relación mostrada más abajo (*ecuación 1*). Por otra parte, físicamente, esta tensión está limitada por la tensión límite del material de cizalladura  $\tau_Y$ . Entonces, si la deformación plástica que sufre este elemento está dominada por el fenómeno de cizallamiento, la tensión de fricción debería satisfacer la relación (ver *ecuación 2*). Finalmente, el modelo de fricción que se aplica durante los cálculos numéricos es el mostrado en la *ecuación 3*.

$$\tau(x) = \mu \cdot \sigma(x) \quad (\text{ecuación 1})$$

$$\tau = \tau_Y = \frac{\sigma_{eq}}{\sqrt{3}} \quad (\text{ecuación 2})$$

$$\tau(x) = \min(\mu \cdot \sigma(x); \tau_Y(x)) \quad (\text{ecuación 3})$$

### ***5.2.2.- Estudio de la frecuencia de segmentación.***

Para cada una de las simulaciones realizadas, observamos cómo se generaban las bandas de cizalladura, anotando los tiempos de aparición de las mismas con el fin de calcular la frecuencia de segmentación para cada una de las velocidades de corte.

La metodología empleada fue la siguiente: en primer lugar anotamos los tiempos de aparición de las 4 primeras bandas de cizalladura, en segundo lugar calculamos los incrementos de tiempo entre una y otra banda y por último calculamos las frecuencias, realizando una media entre los 4 valores, obteniendo los resultados mostrados en la *tabla 5.4*. En algunas de las simulaciones no fue posible llegar a las cuatro primeras bandas de cizallado debido a la distorsión en las soluciones y se cogieron los datos de las dos primeras.



Tabla 5.4.- Frecuencias de corte obtenidas numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$ .

FRECUENCIA (KHz)							
Velocidad (m/s)	Malla 1 $\mu m$		Malla 2 $\mu m$				
	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,8$	$\mu = f(v)$	
1	8,33	7,14	12,5	10	7,14	( $\mu = 0,7$ )	7,2
2	25	20	25	25	20	( $\mu = 0,6$ )	23
4	50	50	50	50	50	( $\mu = 0,5$ )	40
6	75,75	75,75	75	65	75	( $\mu = 0,4$ )	75
10	125	125	125	125	125	( $\mu = 0,3$ )	125
20	250	250	250	250	250	( $\mu = 0,2$ )	261
25	312,5	312,5	312,5	312,5	312,5	( $\mu = 0,15$ )	346

A continuación procedemos a realizar una representación de los resultados mostrados en la *tabla 5.4* con respecto a las velocidades de corte estudiadas, para así estudiar qué influencia presentan los factores independientes sobre la frecuencia de segmentación.

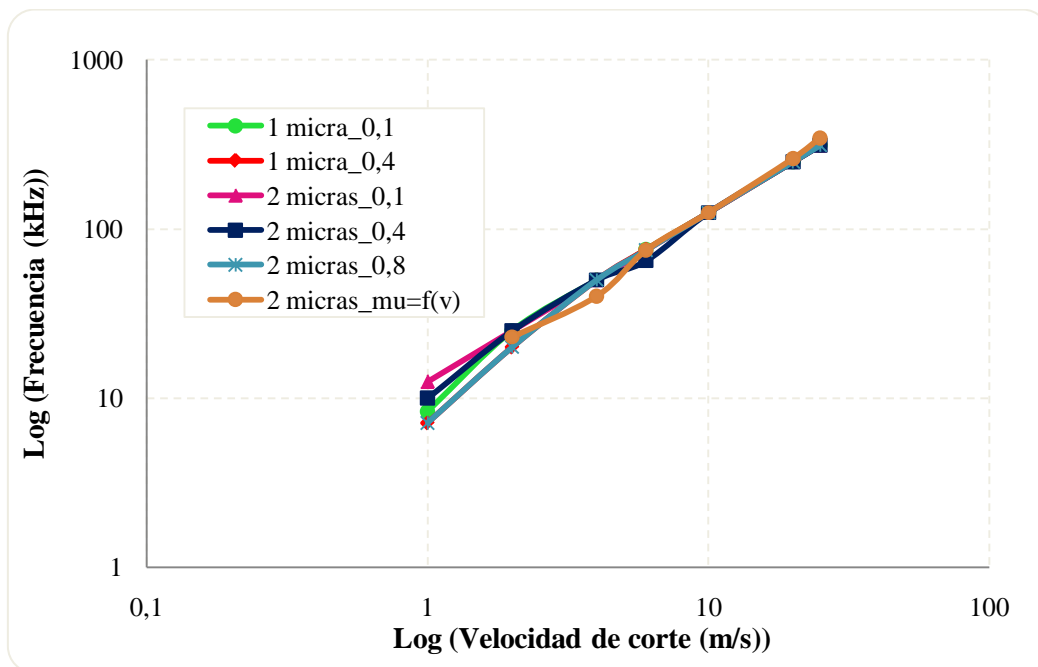


Figura 5.8.- Representación de la frecuencia de segmentación para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con relación a la velocidad de corte.



**Influencia del tamaño de la malla sobre la frecuencia de segmentación:**

A partir de la *figura 5.8* y de la *tabla 5.4* podemos observar como la frecuencia es independiente del tamaño de malla utilizada ya que los resultados obtenidos son prácticamente iguales para los dos casos y por ese motivo, para el resto de estudios realizados para la frecuencia de segmentación únicamente vamos a utilizar una de las curvas (malla 2  $\mu\text{m}$  y  $\mu = 0,4$ ).

**Influencia de la velocidad sobre la frecuencia de segmentación:**

A partir de la *figura 5.8* y de la *tabla 5.4*, podemos concluir que la frecuencia de segmentación presenta una tendencia lineal con respecto a la velocidad de corte (para una representación logarítmica) con pendiente ascendente, esto quiere decir que, a medida que aumenta el valor de la velocidad de corte lo hace también la frecuencia de segmentación. Por lo tanto, a mayores velocidades de corte, mayores valores de frecuencia de segmentación, y por tanto mayor segmentación de la viruta durante el proceso de mecanizado. Es importante destacar, que la frecuencia para bajas velocidades es difícil de calcular porque apenas existe banda de cizallado.

**Influencia de la fricción sobre la frecuencia de segmentación:**

Los estudios realizados para los distintos coeficientes de fricción han mostrado que dicho parámetro no influye sobre la frecuencia de segmentación, ya que los resultados obtenidos son iguales para todas las frecuencias utilizadas. Al igual que ocurre con el tamaño de malla.



**Comparación de las frecuencias de segmentación obtenidas a partir de nuestro modelo numérico y las obtenidas experimentalmente:**

En este apartado vamos a proceder a realizar una comparación entre los resultados obtenidos numéricamente a partir de nuestro modelo y los obtenidos experimentalmente por Molinari et al. [26] y Cotterell y Byrne [22] en escala logarítmica (figura 5.14).

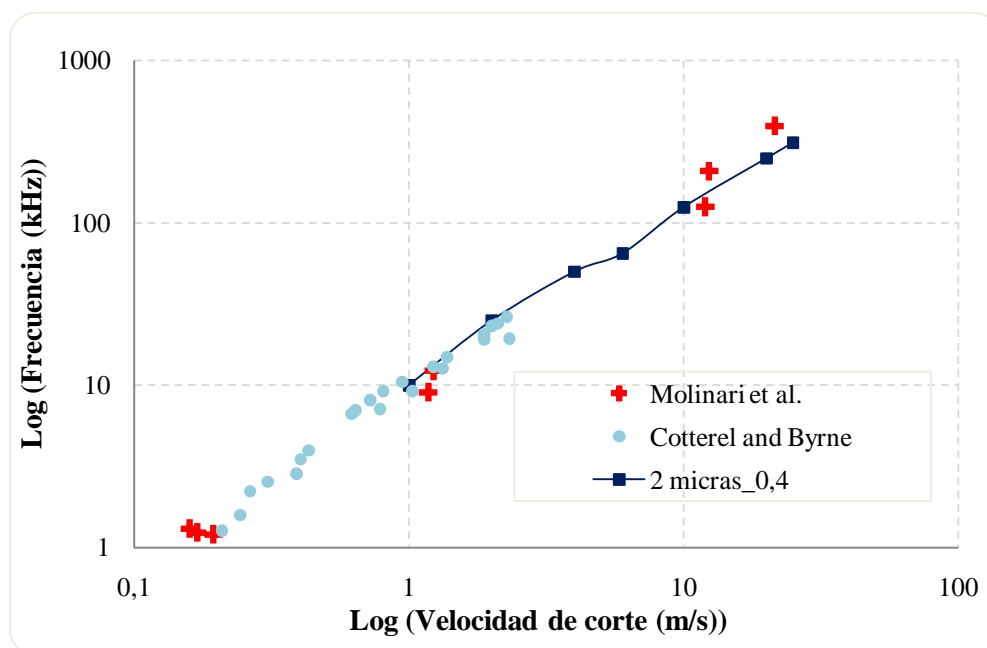


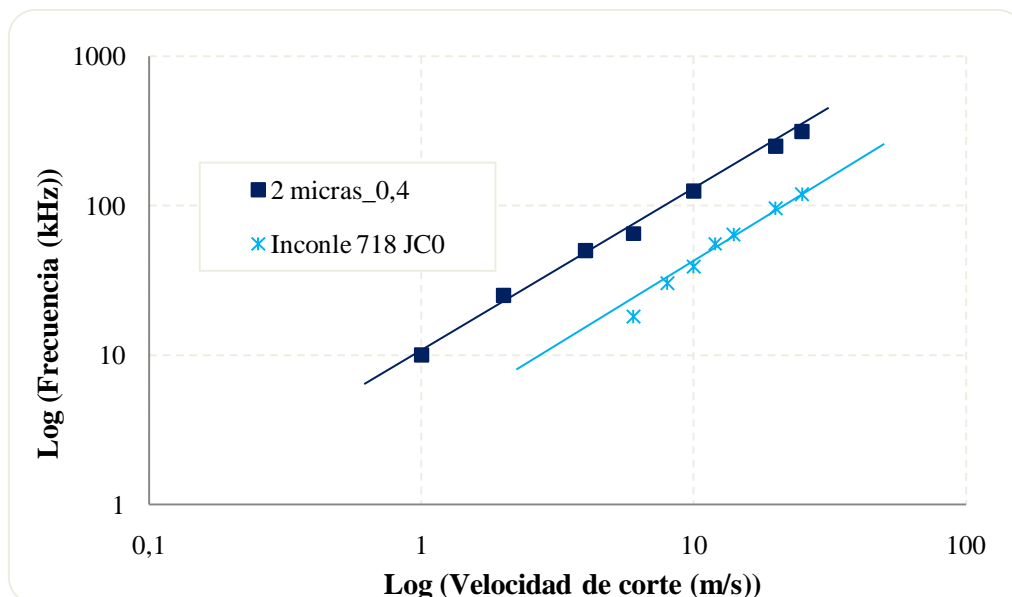
Figura 5.9.- Comparación entre la frecuencia de segmentación numérica y la experimental de Molinari et al [26] y Cotterell y Byrne [22].

Como se puede apreciar en la figura 5.9 los resultados obtenidos a partir de nuestro modelo son exactamente iguales a los obtenidos por Cotterell y Byrne a bajas velocidades, y muy parecidos a los obtenidos por Molinari et al. para altas velocidades de corte. La tendencia es la misma tanto para los resultados numéricos como para los experimentales. Por lo tanto podemos concluir que nuestro modelo es fiable y válido. No obstante es importante recordar que las condiciones de corte, la herramienta utilizada y el tratamiento térmico superficial de la aleación, son distintos para los estudios experimentales y los de nuestro modelo numérico.



**Comparación de las frecuencias de segmentación obtenidas para el  $Ti_6Al_4V$  y las obtenidas para el Inconel 718:**

Para terminar con el estudio de la frecuencia de segmentación, vamos a proceder a realizar una comparación entre los resultados obtenidos para nuestro modelo y los obtenidos para otro material distinto, el Inconel 718, para así explicar qué relación encontramos entre ambos materiales (*figura 5.10*). Los resultados numéricos correspondientes al Inconel 718 se han obtenido de [30].



*Figura 5.10.- Comparación de la frecuencia de segmentación entre el  $Ti_6Al_4V$  y el Inconel 718 [30].*

A la vista de la *figura 5.10* observamos que existe cierta analogía entre los resultados obtenidos para el  $Ti_6Al_4V$  y el Inconel 718, lo cual nos indica que tienen un comportamiento similar en lo que al mecanizado se refiere, siendo los valores para este último algo menores que para la aleación de titanio.



### 5.2.3.- Estudio del ancho de banda de cizalladura.

A partir del programa ABAQUS, hemos sido capaces de analizar las bandas de cizalladura. Para ello hemos llevado a cabo un análisis local mediante la herramienta "path", del nivel de deformación que sufre el material a lo largo de una distancia perpendicular a la banda.

La metodología seguida es la siguiente: a partir del archivo .odb generado por ABAQUS, se reproduce paso a paso el proceso de corte hasta que aparece la primera banda de cizalladura, previamente se ha seleccionado la opción de *deformación plástica sobre los puntos integrados* (PEEQ) en "Field - Output". Sobre la banda de cizallado, se genera una línea de puntos rojos "Tools - Path" (figura 5.11) lo más perpendicular posible a la banda, y ésta será la longitud sobre la que se medirá la deformación.

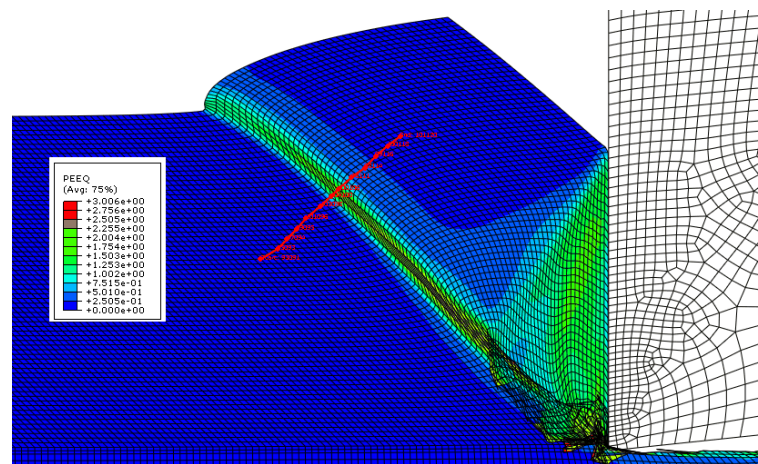


Figura 5.11.- Detalle del "Path" generado en ABAQUS para el cálculo del ancho de banda de cizalladura.

La figura 5.12 muestra como se ha calculado el valor del ancho de banda de cizalladura. Es la representación plástica en función de la longitud del "Path".



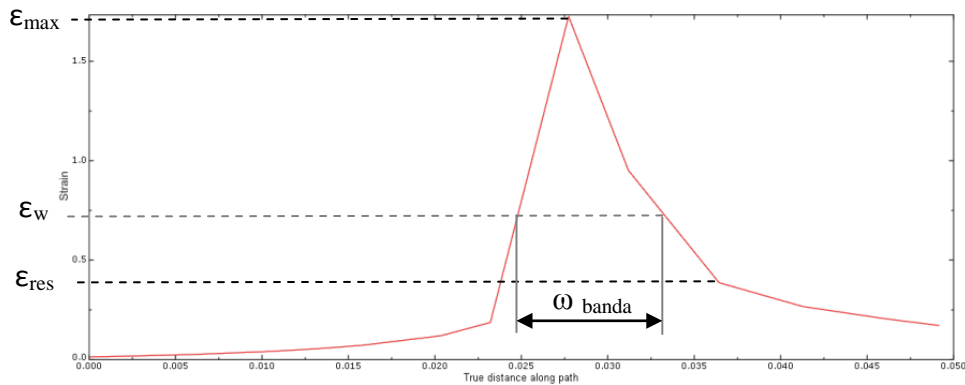


Figura 5.12.- Deformación plástica en función de la longitud del "Path".

De la figura 5.12 se extraen los valores de la deformación máxima que se produce en la banda ( $\epsilon_{max}$ ) y de la deformación residual ( $\epsilon_{res}$ ), que es la deformación que se aleja de la zona crítica de estudio y que no interesa.

Un 20% de la deformación máxima, más un 80% de la deformación residual, dará un valor de deformación que limitará el ancho de banda. Destacar que este método, se ha utilizado a modo de aproximación y que los porcentajes escogidos no están relacionados con ninguna teoría en especial. De hecho, un objeto de estudio futuro podría ser ver la variación del ancho de banda para distintos porcentajes aplicados.

$$\begin{aligned}\epsilon_{banda} &= \epsilon_{max} - \epsilon_{res} \\ \epsilon_w &= 20\% \epsilon_{banda} + \epsilon_{res}\end{aligned}$$

A partir de las ecuaciones mostradas arriba y del procedimiento ya explicado, hemos obtenido los anchos de banda para cada simulación. Los resultados los hemos recopilado en la tabla 5.5.



Tabla 5.5.- Anchos de banda obtenidos numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$ .

ANCHO DE BANDA ( $\mu m$ )						
Velocidad (m/s)	Malla 1 $\mu m$		Malla 2 $\mu m$			
	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,8$	$\mu = f(v)$
1	-	-	-	-	-	( $\mu = 0,7$ )
2	5,61	6,66	8,39	-	-	( $\mu = 0,6$ )
4	4,23	5,37	6,52	11,5	7,696	( $\mu = 0,5$ )
6	3,89	3,66	5,92	7,035	6,539	( $\mu = 0,4$ )
10	3,97	3,73	4,72	5,68	5,107	( $\mu = 0,3$ )
20	3,83	3,5	3,84	5,56	6,4	( $\mu = 0,2$ )
25	3,8	1,6	4,71	5,69	6,047	( $\mu = 0,15$ )

A partir de los resultados recogidos en la *tabla 5.5* podemos observar que no existe una clara influencia del coeficiente de fricción sobre el ancho de banda de cizallado. Por el contrario si existe una cierta influencia tanto del tamaño de malla como de la velocidad de corte, la cual explicamos a continuación.

Con los datos de la *tabla 5.5* hemos realizado una representación del ancho de banda de ambas mallas para una fricción de 0,4 con respecto a los resultados obtenidos experimentales por Molinari et al. (*figura 5.13*). Dicha comparación nos va a servir para estudiar la influencia de la velocidad de corte y del tamaño de la malla sobre el ancho de banda.

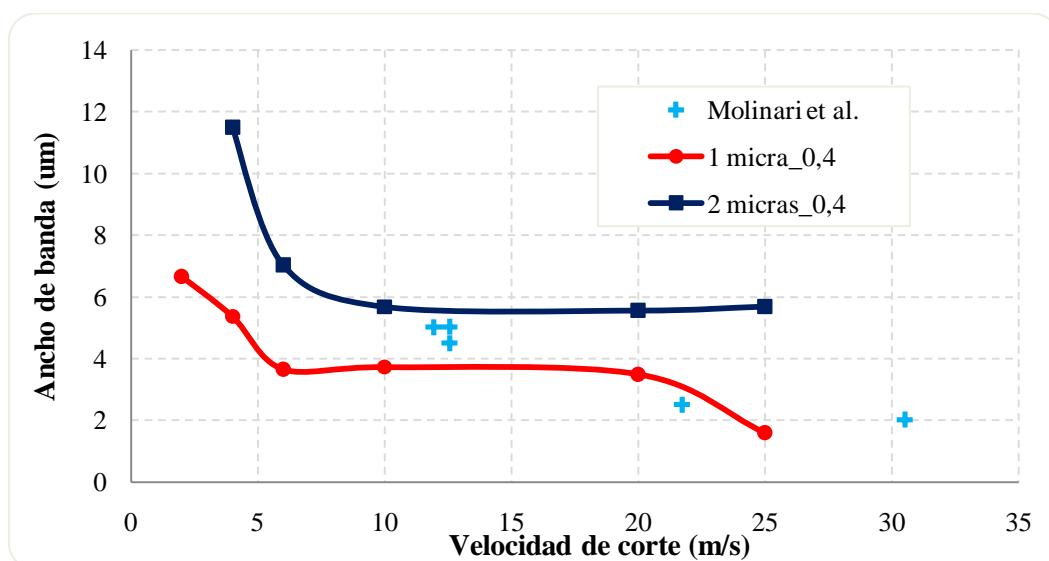


Figura 5.13.- Ancho de banda de cizallado numérico y experimental de Molinari et al. para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con relación a la velocidad de corte.



Si nos fijamos en la *figura 5.13*, en la curva obtenida para los resultados de la malla de 2  $\mu\text{m}$  se aprecia claramente una disminución del ancho de banda a medida que aumentamos la velocidad de corte. Para bajas velocidades el valor disminuye bruscamente, pero a partir de una velocidad de 10 m/s se alcanza un valor estable.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos experimentalmente por Molinari et al. observamos que efectivamente el ancho de banda disminuye al aumentar la velocidad de corte al igual que ocurría para nuestro caso numérico de 2  $\mu\text{m}$ , pero en esta ocasión el valor estable se va a alcanzar a partir de una velocidad de 20 m/s.

Para disminuir las diferencias existentes entre nuestro modelo numérico de tamaño 2  $\mu\text{m}$  y el experimental de Molinari et al. se realizó un nuevo estudio para una malla más refinada de tamaño 1  $\mu\text{m}$  obteniéndose la curva mostrada en la *figura 5.13*. Como se puede observar en dicha figura, los resultados obtenidos para la malla de 1  $\mu\text{m}$  se ve como disminuyen hasta la velocidad de 25 m/s lo cual se aproxima bastante a los resultados experimentales de Molinari et al. Con lo que podemos concluir que nuestros resultados son aceptables y por lo tanto nuestro modelo válido.

Por lo tanto para concluir podemos decir que la influencia de la velocidad de corte sobre el ancho de banda es tal que al aumentar su valor va a disminuir el ancho de banda hasta alcanzarse un valor constante, y es preferible un tamaño de malla de 1  $\mu\text{m}$  ya que los resultados que se obtienen se aproximan más a los obtenidos experimentalmente.



#### 5.2.4.- Estudio del ángulo de cizallado.

Para el ángulo de cizallado vamos a realizar diversos estudios, vamos a comprobar que influencia tienen ciertas variables independientes (velocidad de corte y coeficiente de fricción) sobre dicho ángulo, vamos a estudiar la influencia de la teoría de Merchant y por último vamos a realizar una comparación entre los resultados obtenidos numéricamente y los obtenidos experimentalmente por Gente y Hoffmeister.

En primer lugar vamos a explicar que metodología hemos seguido para calcular el ángulo de cizallado. A partir del archivo .odb generado por ABAQUS, se reprodujo paso a paso el proceso de corte hasta que aparecía la primera banda de cizalladura, para cada una de las simulaciones. Para ello, previamente tuvimos que seleccionar la opción de *deformación plástica sobre los puntos integrados (PEEQ)* en "Field - Output". Sobre dicha banda de cizallado, medimos las distancias "x" e "y" desde la base de la viruta no deformada hasta los extremos de la banda de cizallado como se muestra en la *figura 5.14*.

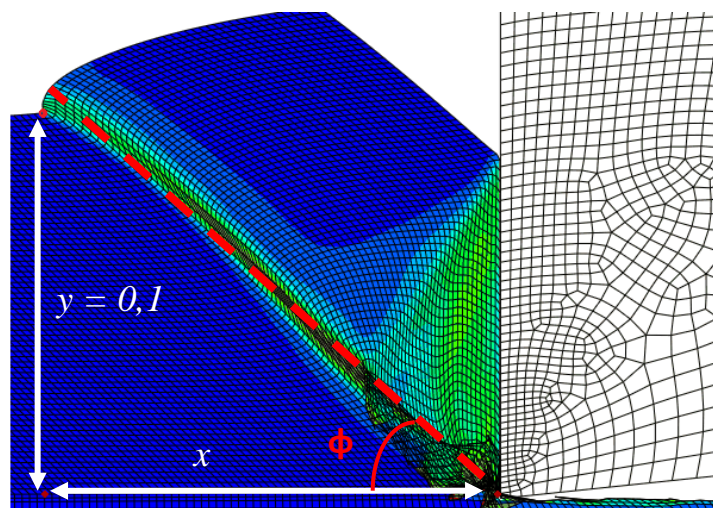


Figura 5.14.- Metodología seguida para calcular el ángulo de cizallado.



## Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del $Ti_6Al_4V$

Por tanto, para calcular el valor del ángulo de cizallado, basta con calcular la arco tangente de "y" entre "x". Destacar, que el valor de "y" siempre es igual a 0,1, que es el valor correspondiente al avance de nuestro modelo y que el valor de "x" es el que varía para cada una de las simulaciones.

El estudio del ángulo de cizallado se ha realizado única y exclusivamente para la malla de 2 micras, utilizando distintos valores de los coeficientes de fricción ( $\mu = 0,1$ ;  $\mu = 0,4$  y  $\mu = 0,8$ ) y las mismas velocidades que se han venido estudiando a lo largo del proyecto. Todos los resultados obtenidos se muestran en la *tala 5.6* a partir de la cual se van a realizar diversas representaciones y comparaciones.

*Tabla 5.6.- Resultados del ángulo de cizallado obtenidos numéricamente para la aleación  $Ti_6Al_4V$ .*

ÁNGULO DE CIZALLADO (°)			
Velocidad (m/s)	Malla 2 $\mu$ m		
	$\mu = 0,1$	$\mu = 0,4$	$\mu = 0,8$
1	34,08	22,14	20,53
2	37,15	23,22	21,57
4	39,34	36,46	25,46
6	41,76	38,44	27,88
10	42,27	40,28	28,39
20	43,88	40,76	36,73
25	44,91	41	37,15

Para estudiar qué influencia tiene la velocidad de corte y el coeficiente de fricción sobre el ángulo de cizallado nos vamos a ayudar de la *figura 5.15* y de la *tabla 5.6*.

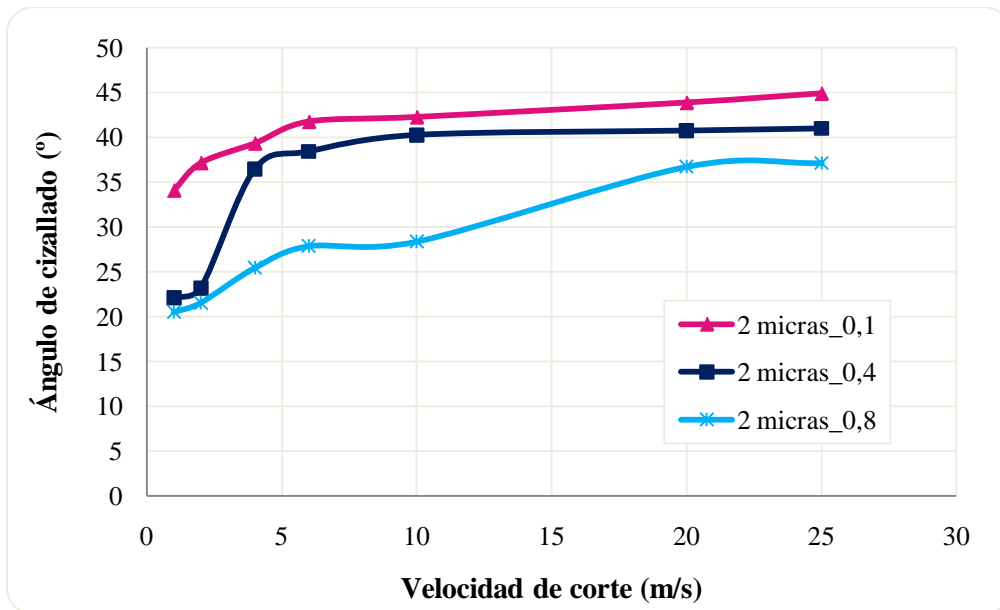


Figura 5.15.- Representación de los resultados numéricos del ángulo de cizallado para la aleación  $Ti_6Al_4V$  con relación a la velocidad de corte.

#### **Influencia de la velocidad de corte sobre el ángulo de cizallado:**

Como se puede observar en la *figura 5.15*, el ángulo de cizallado aumenta a medida que aumenta la velocidad de corte tendiendo a alcanzarse un valor más o menos constante. Más adelante comprobaremos a partir de los resultados experimentales obtenidos por Gente y Hoffmeister que nuestros resultados son similares a los suyos y tienen la misma tendencia.

#### **Influencia de la fricción sobre el ángulo de cizallado:**

La fricción es otro de los parámetros que influye en el valor del ángulo de cizallado. Al contrario que ocurría con la velocidad de corte, al aumentar el valor del coeficiente de fricción, vamos a observar una disminución en el ángulo de cizallado. Para explicar la razón por la que ocurre esto, vamos a recurrir a la teoría utilizada por Ernst - Merchant.



**Teoría de Ernst - Merchant:**

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

Ernst - Merchant consiguió demostrar que la relación entre los ángulos de cizalladura, rozamiento y desprendimiento, cumplían la siguiente ecuación:

$$2\phi + \rho - \gamma = \frac{\pi}{2}$$

Donde  $\phi$  es el ángulo de cizalladura,  $\rho$  el ángulo de rozamiento y  $\gamma$  el ángulo de desprendimiento. Destacar que el ángulo de rozamiento se calcula como la arco tangente del coeficiente de fricción ( $\rho = \tan^{-1} \mu$ ).

Ernst -Merchant llegó a las siguientes conclusiones:

1. si el ángulo de desprendimiento aumenta, el ángulo de cizalladura también aumenta,
2. *si el ángulo de rozamiento disminuye (disminuye la fricción), el ángulo de cizalladura aumenta,*
3. si el ángulo de cizalladura aumenta, disminuye el área de corte (se necesita menos potencia),
4. si el ángulo de cizalladura disminuye, aumenta el área de corte (se necesita una potencia mayor).



Por lo tanto, como se comprueba en su segunda conclusión, al disminuir el ángulo de rozamiento ó lo que es lo mismo, disminuir el coeficiente de fricción, el ángulo de cizallado aumenta. Esta conclusión se cumple totalmente para los resultados obtenidos y mostrados anteriormente.

Como curiosidad, destacar que el espesor de la viruta se puede calcular a partir de la profundidad de corte, del ángulo de desprendimiento y del ángulo de cizalladura. Esto no es objeto de estudio de nuestro proyecto, pero podría plantearse como posible trabajo futuro.

**Comparación del ángulo de cizallado obtenido a partir de nuestro modelo numérico y el obtenido experimentalmente:**

Por último, vamos a realizar una comparación entre los resultados obtenidos numéricamente para nuestro modelo y los obtenidos experimentalmente por Gente y Hoffmeister [2].

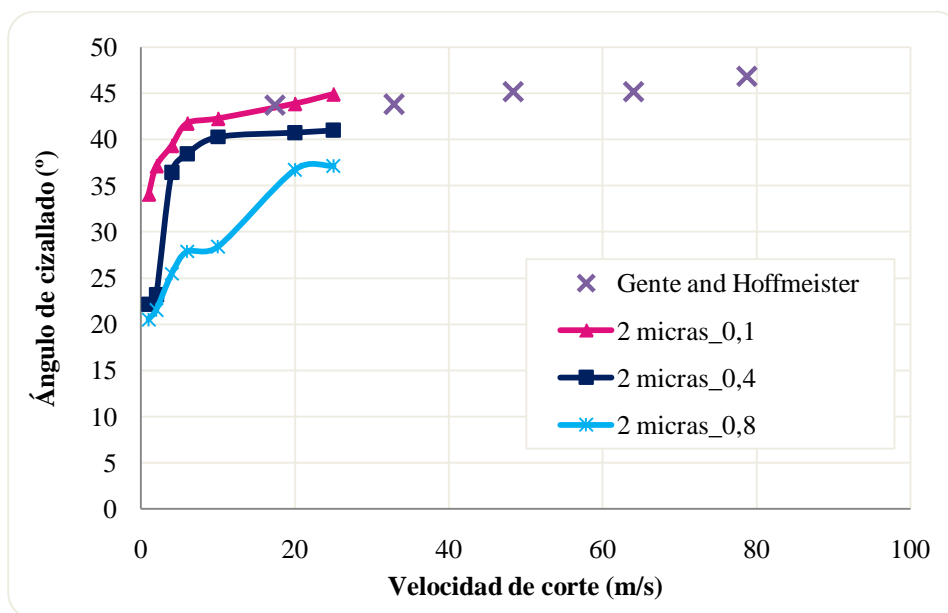


Figura 5.16.- Comparación del ángulo de cizallado obtenido numéricamente y el obtenido experimentalmente por Gente y Hoffmeister (2001).





Como se puede comprobar a partir de la *figura 5.16*, los resultados obtenidos por Gente y Hoffmeister muestran como a medida que aumenta la velocidad de corte el ángulo de cizallado aumenta ligeramente de valor tendiendo a alcanzarse un valor más o menos estable. Se puede apreciar como el resultado que obtuvieron para la velocidad más baja estudiada en su experimento (17,44 m/s), está situada en la curva obtenida para nuestros resultados numéricos (para  $\mu = 0,1$ ). También se aprecia como las curvas obtenidas a partir de nuestro modelo son muy similares en forma a la obtenida experimentalmente por Gente y Hoffmeister; con lo que podemos concluir que nuestro modelo predice de forma bastante fiable los resultados y que por lo tanto es válido.

### ***5.2.5.- Estudio de la morfología de la viruta.***

Este último apartado, lo vamos a dedicar a estudiar la morfología de la viruta en función de otros parámetros como son la velocidad de corte ó la fricción. Para ello nos vamos a ayudar de los resultados proporcionados por ABAQUS. Se va a guardar una fotografía para cada simulación seleccionando la opción de deformación plástica sobre los puntos integrados (PEEQ) "*Field - Output*".

Destacar que las fotografías guardadas, se han tomado para la misma distancia mecanizada en todas las simulaciones aproximadamente, para así poder comparar unas con otras. En algunos casos ha sido imposible guardar la foto para esa distancia mecanizada, ya que la simulación abortó antes de tiempo debido a una excesiva distorsión. Vamos a mostrar los resultados obtenidos para la malla de  $2 \mu\text{m}$  y  $\mu = 0,1$  ya que la geometría de la viruta se observa perfectamente en su totalidad, no como para el resto de casos en los que la viruta se queda apelmazada para altas velocidades y no se aprecia muy bien visiblemente su geometría.

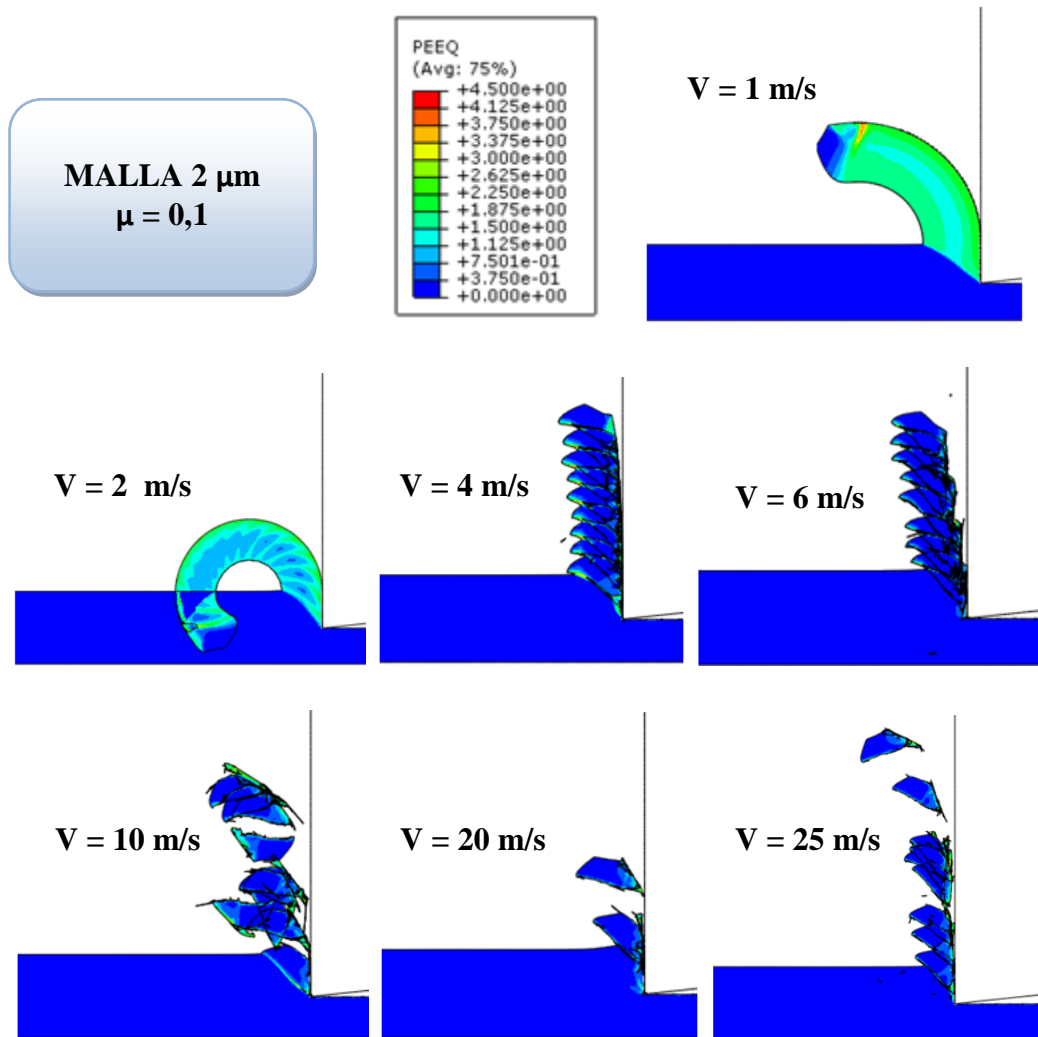


Figura 5.17.- Segmentación de la viruta para la simulación con malla  $2 \mu\text{m}$  y fricción  $\mu = 0,1$ .

**Influencia de la velocidad de corte sobre la morfología de viruta:**

A partir de la *figura 5.17* podemos observar como a medida que aumenta la velocidad de corte la morfología de la viruta pasa de ser continua a ser segmentada. Para bajas velocidades (como se observa para las velocidades de 1 y 2 m/s) la viruta es totalmente continua, existiendo una longitud de contacto entre la viruta y la herramienta bastante alta. Para velocidades de 4 y 6 m/s, la viruta es discontinua observándose una viruta con forma de dientes de sierra y siendo la longitud de contacto ente la viruta y la herramienta menor que para velocidades ya comentadas. Por último, para velocidades



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

de 10, 20 y 25 m/s, se observa como la viruta está totalmente segmentada y se desprende en pequeños trozos, siendo la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta todavía mucho menor. Todo lo comentado para la *figura 5.19* se cumple para el resto de casos estudiados, pero hemos decidido mostrar este caso porque es en el que mejor se aprecian los resultados.

Por lo tanto, como conclusión podría decirse que a medida que aumenta la velocidad de corte, la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta disminuye y la morfología de la viruta pasa de ser continua a ser segmentada.

### **Influencia de la fricción sobre la morfología de viruta:**

Para realizar un estudio de cómo influye el coeficiente de fricción sobre la morfología de la viruta, mostramos en la *figura 5.18* una comparación de los resultados obtenidos para la malla de 2  $\mu\text{m}$  para las distintas fricciones estudiadas y para velocidades de 1, 2 y 4 m/s.

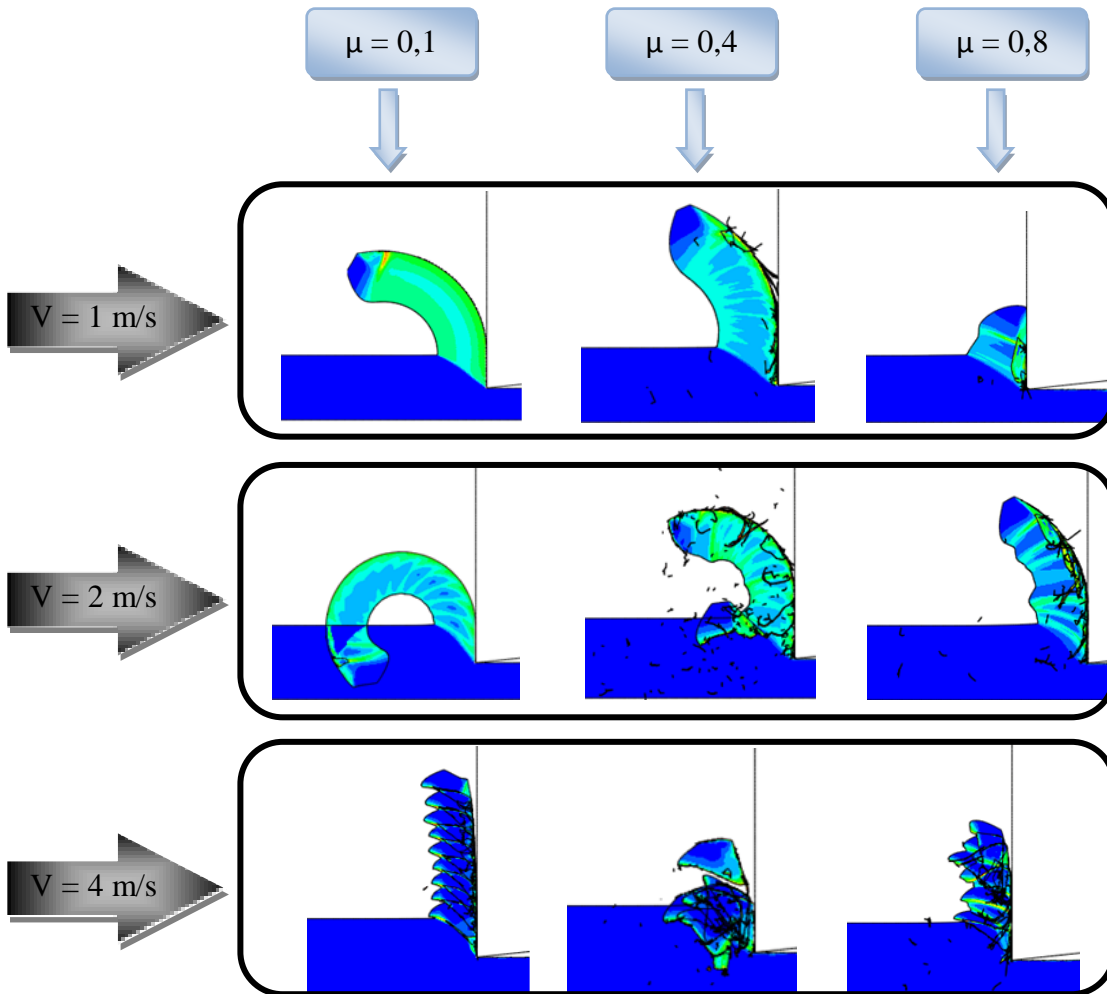
Como se puede observar en la *figura 5.18*, las virutas obtenidas para los casos de velocidades 1 y 2 m/s son continuas mientras que para velocidad 4 m/s la viruta es segmentada, por este motivo vamos a realizar una distinción entre ambos casos para estudiar la influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología de la viruta.

Para las velocidades de 1 y 2 m/s, podemos comprobar cómo la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta aumenta a medida que aumentamos el coeficiente de fricción. Este aumento de la longitud de contacto se puede apreciar claramente gracias a que la viruta es continua. No ocurre lo mismo para el caso de velocidad 4 m/s en el que la viruta ya no es continua, sino que es segmentada. En este



*Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

caso no es posible distinguir dicha longitud de contacto y por lo tanto no se puede estudiar la influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología de viruta.



*Figura 5.18.- Influencia de la fricción sobre la morfología de viruta.*

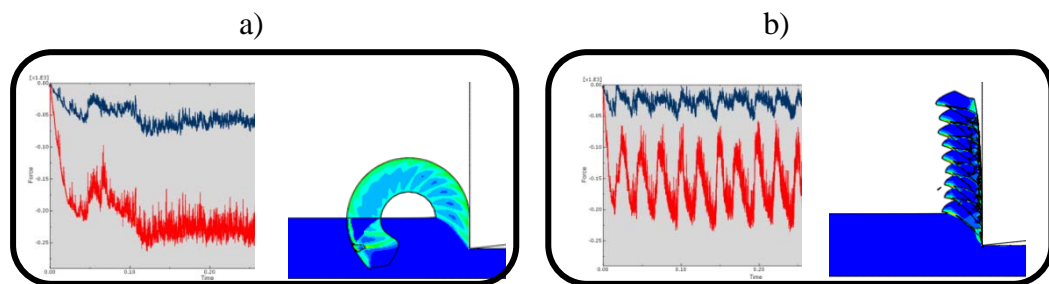
Para concluir podemos decir que, para bajas velocidades en las que la morfología de la viruta obtenida es continua, el coeficiente de fricción influye de manera que si aumentamos su valor va a aumentar la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta. Mientras que para altas velocidades en las que la viruta ya no es continua no existe ningún tipo de influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología de viruta.



**Relación existente entre las gráficas de las fuerzas de corte y de avance y las figuras de la morfología de viruta.**

Como ya se explicó, existían dos tipos de gráficas distintas para las fuerzas de corte y avance, una en la que se alcanzaba un valor estacionario y otra en la que se repetía de manera continua un mismo patrón. En la *figura 5.19* hemos relacionado cada uno de estos dos tipos de gráficas con su morfología de viruta correspondiente para explicar que es lo que realmente ocurre.

En la *figura 5.19 a)* observamos como la gráfica de las fuerzas de corte y de avance alcanzan un valor contante, que es lo que nos indica que la viruta no presenta segmentación y que es totalmente continua. Por el contrario para el caso *b)* podemos decir que los picos donde se alcanzan las fuerzas máximas tanto de corte como de avance nos indican que se produce un segmento de viruta y es lo que se puede apreciar en la fotografía de la viruta.



*Figura 5.19.- Relación entre las fuerzas de corte y avance y la morfología de viruta. a) fuerzas correspondientes para una viruta continua y b) fuerzas correspondientes para una viruta segmentada.*



## Capítulo VI

### 6.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

#### 6.1.- CONCLUSIONES.

Los objetivos principales de este proyecto eran analizar y validar el modelo propuesto para la aleación de titanio  $Ti_6Al_4V$  con los resultados experimentales de la bibliografía y estudiar qué influencia tienen ciertos parámetros como la velocidad de corte, la fricción entre la pieza y la herramienta o el tamaño de la malla sobre otros factores como las velocidades de corte y de avance, la frecuencia de segmentación, el ancho de banda de cizalladura, el ángulo de cizalladura y la morfología de la viruta. A su vez también se han realizado algunas comparaciones entre los resultados obtenidos para nuestro modelo y los obtenidos con otro modelo para el Inconel 718. Las conclusiones a las que hemos llegado las explicamos a continuación.

1.- El modelo utilizado para la aleación  $Ti_6Al_4V$  ha sido analizado y validado frente a los resultados experimentales de Hoffmeister et al. [26], Gente y Hoffmeister [2], Molinari et al. [26], Hua y Shivpuri [24], Cotterell y Byrne [22], Fang y Wu [3] y Armendia et al. [23], ya que las tendencias de las fuerzas de corte y avance son las mismas y los valores numéricos son similares.

2.- Para un valor constante de fricción, el valor de la fuerza de corte disminuye ligeramente con la velocidad de corte, para las velocidades que hemos considerado en nuestro estudio. La evolución de las fuerzas de corte y de avance con el tiempo dependen de la velocidad de corte. Cada pico en la fuerza de corte, se corresponde con la formación de una banda de cizallado a lo largo del espesor de la viruta.

3.- La frecuencia de segmentación aumenta con la velocidad de corte de forma lineal, mientras que el coeficiente de fricción o el tamaño de la malla no modifican el valor de dicha frecuencia.



## *Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V*

4.- Al comparar las frecuencias de segmentación obtenidas numéricamente con las obtenidas experimentalmente por Molinari et al. y Cotterell y Byrne, se comprueba que ambos resultados son prácticamente iguales con lo que el modelo numérico estudiado queda validado.

5.- Existe cierta analogía entre los resultados obtenidos para la aleación Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V y el Inconel 718, lo cual nos indica que ambos materiales tienen un comportamiento similar en lo que al mecanizado se refiere, siendo los valores para este último algo menores que para la aleación de titanio.

6.- No existe una clara influencia del coeficiente de fricción sobre el ancho de banda de cizallado.

7.- La influencia de la velocidad de corte sobre el ancho de banda es tal que al aumentar su valor va a disminuir el ancho de banda hasta alcanzarse un valor constante.

8.- Para realizar una comparación del ancho de banda de cizallado numérico y el experimental, es preferible utilizar la malla de tamaño 1  $\mu\text{m}$  ya que se aproxima más a los resultados experimentales que la malla de 2  $\mu\text{m}$ . Para la malla de 2  $\mu\text{m}$  el ancho de banda alcanza un valor estable a partir de una velocidad de corte de 10 m/s, mientras que para la malla de 1  $\mu\text{m}$  y para los resultados experimentales se alcanza un valor estable del ancho de banda a partir de una velocidad de corte de 20 m/s.

9.- La influencia de la velocidad de corte sobre el ángulo de cizallado es tal que al aumentar su valor va a aumentar también el ángulo de cizallado ligeramente tendiendo a alcanzarse un valor estacionario. Por el contrario, la influencia del coeficiente de fricción es tal que al aumentar su valor se va a producir una disminución en el ángulo de cizalladura, lo cual ha quedado demostrado a partir de la teoría de Ernst - Merchant.

10.- Comparando los ángulos de cizallado numéricos con los experimentales se aprecia como las curvas obtenidas a partir de nuestro modelo son muy similares en forma a la obtenida experimentalmente por Gente y Hoffmeister; con lo que podemos



concluir que nuestro modelo predice de forma bastante fiable los resultados y que por lo tanto es válido.

11.- La influencia de la velocidad de corte sobre la morfología de viruta es tal que, a medida que aumenta la velocidad de corte, la longitud de contacto entre la herramienta y la viruta disminuye y la morfología de la viruta pasa de ser continua a ser segmentada.

12.- Por último podemos decir que la influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología de viruta es tal que, para bajas velocidades en las que la morfología de la viruta obtenida es continua, el coeficiente de fricción influye de manera que si aumentamos su valor va a aumentar la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta. Mientras que para altas velocidades en las que la viruta ya no es continua no existe ningún tipo de influencia del coeficiente de fricción sobre la morfología de viruta.





## **6.2.- TRABAJOS FUTUROS.**

A continuación se proponen ideas que han ido surgiendo mientras se ha desarrollado este proyecto, con el objetivo de poder complementar este y seguir avanzando en la investigación del mecanizado de las aleaciones de titanio, ya que hoy en día están tomando una gran importancia en la industria.

1.- Una vez visto que el modelo responde bastante bien y es óptimo para simular el proceso de mecanizado del Ti<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>V, sería interesante aplicarlo implementado para las propiedades de otros materiales termo-resistentes.

2.- Estudiar la influencia del ángulo de desprendimiento.

3.- Estudiar el daño y desgaste que sufre la herramienta en el mecanizado de este tipo de materiales, con el objetivo de analizar su vida en servicio.

4.- Estudiar la influencia de la profundidad de corte.

5.- Estudio de la influencia del radio de punta de la herramienta.

6.- Estudiar la influencia del ángulo de incidencia.

7.- Realizar nuevas simulaciones para distintos parámetros de la ley de Johnson - Cook, y ver como varían los resultados obtenidos.

8.- Estudiar la influencia del avance.

9.- Realizar estudios para mayores velocidades de corte y estudiar el comportamiento del material.

10.- Utilización de porcentajes distintos para calcular de forma numérica el ancho de banda. En nuestro caso habíamos escogido un 20% de la deformación máxima más un 80% de la deformación residual.



11.- Utilizar mallas más refinadas.

12.- Realizar más simulaciones para distintos coeficientes de fricción y comparar con los resultados ya obtenidos.

14.- Calcular el espesor de la viruta a partir de la profundidad de corte, del ángulo de desprendimiento y del ángulo de cizallado.



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

**Escuela Politécnica Superior**

**PRESUPUESTO DE PROYECTO**

**1.- Autor:** Marta María Moure Cuadrado.

**2.- Departamento:** Ingeniería Mecánica.

**3.- Descripción del Proyecto:**

- *Título:* Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del  $Ti_6Al_4V$

- *Duración (meses):* 5

*Tasa de costes Indirectos:* 20%

**4.- Presupuesto total del Proyecto (valores en Euros):** 33.014 Euros

**5.- Desglose presupuestario (costes directos)**

PERSONAL

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) <sup>a)</sup>	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Soldani, Xavier Moure cuadrado, Marta María		Ingeniero Senior	1	4.289,54	4.289,54	
		Ingeniero	5	2.694,39	13.471,95	
<b>Hombres mes 6</b>				<b>Total</b>	<b>17.761,49</b>	

EQUIPOS

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable <sup>d)</sup>
3 ordenadores de calculo	1.500,00	100	12	24	750,00
3 licencias de Abaqus	9.000,00	100	12	12	9.000,00
<b>Total</b>					<b>9.750,00</b>



d) Fórmula de cálculo de la Amortización:  $\frac{A}{B} \cdot C \cdot D$

A = nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado

B = periodo de depreciación (60 meses)

C = coste del equipo (sin IVA)

D = % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente 100%)

### SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS

Descripción	Empresa	Coste imputable
<b>Total</b>		0,00

### OTROS COSTES DIRECTOS DEL PROYECTO<sup>e)</sup>

Descripción	Empresa	Costes imputable
<b>Total</b>		0,00

e) Este capítulo de gastos incluye todos los gastos no contemplados en los conceptos anteriores, por ejemplo: fungible, viajes y dietas, otros,...

### 6.- Resumen de costes

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	17.761
Amortización	9.750
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	0
Costes Indirectos	5.502
<b>Total</b>	<b>33.014</b>



## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] <http://www.ifi.uio.no/siag/problems/grandine/> Accedido en Julio de 2010.
- [2] Gente, A.; Hoffmeister, H.-W.; "Chip Formation in Machining Ti6Al4V at Extremely High Cutting Speeds"; *CIRP Annals - Manufacturing Technology*; vol. 50(1), pp.49-52; ISSN 0007-8506.
- [3] Fang, N.; Wu, Q.; A comparative study of the cutting forces in high speed machining of Ti-6Al-4V and Inconel 718 with a round cutting edge tool"; *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, pp.4385-4389; 2009; ISSN 0924-0136.
- [4] <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=1547> Accedido en julio de 2010.
- [5] [http://www.tdr.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-1020104-093259/](http://www.tdr.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1020104-093259/) Accedido en Agosto de 2010.
- [6] <http://dioscenter.com/> Accedido en agosto de 2010.
- [7] <http://www.dentistaschile.cl/implantes-dentales/> Accedido en agosto 2010.
- [8] <http://idiartec.com/produits2.php?lang=es&id=6> Accedido en agosto de 2010.



[9] <http://discopatiumba.creatuforo.com/-temas4370.html> Accedido en agosto de 2010.

[10] <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:A380-trent900.JPG> Accedido en agosto de 2010.

[11] <http://juandelacuerva.blogspot.com/2008/04/aerometales.html> Accedido en agosto de 2010.

[12] <http://listado.mercadolibre.com.ve/> Accedido en agosto de 2010.

[13] <http://tipsfamilia.com/2008/11/20/bicicleta-de-titanio/> Accedido en agosto de 2010.

[14] Miguèlez Garrido, H., Canteli Fernández, J.A., Cantero Guisandez, J.L. (Curso 2005-2006). *Apuntes de Tecnología Mecánica (Ing. Tec. Industrial: Mecánica)*. Madrid: Universidad Carlos III.

[15] López de Lacalle Marcaide, Luis Norberto: 'Mecanizado de alto rendimiento', Ediciones Técnicas Izaro (2004)

[16] Xavier Soldani, *Modelisation analytique de l'usinage à grande vitesse et etude de l'usure en cratère – application au tournage* (2008).

[17] *Apuntes de Tecnología Mecánica 3º Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica.*



[18] M<sup>a</sup> Henar Miguélez, José Luis Cantero, José Antonio Canteli, José Guillermo Filippone: 'Problemas resueltos de Tecnología de Fabricación', Thomson Paraninfo (2005).

[19] <http://www.cps.unizar.es/~mmcyte/sotfwarecom.html> Accedido en septiembre de 2010.

[20] <http://www.cecalc.ula.ve/adiestramiento/eventos/TIC2/index.html> Accedido en septiembre de 2010.

[21] Hortig, C.; Svendsen, B.; "Simulation of chip formation during high-speed cutting"; *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, pp. 66–76; 2007; ISSN 0924-0136.

[22] Cotterell, M.; Byrne, G.; "Characterisation of chip formation during orthogonal cutting of titanium alloy Ti–6Al–4V"; *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*; pp.81–85; 2008; ISSN 1755-5817.

[23] Armendia, M., Garay, A.; Iriarte, L.M.; Arrazola. P.J.; "Comparison of the machinabilities of Ti6Al4V and TIMETAL® 54M using uncoated WC–Co tools"; *Journal of Materials Processing Technology*; vol. 210, pp.197-203; 2010; ISSN 0924-0136.

[24] Hua, J.; Shivpuri, R.; "Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys"; *Journal of Materials Processing Technology*; vol. 150, pp.124–133; 2004; ISSN 0924-0136.



*Modelización numérica de los fenómenos en corte ortogonal del Ti6Al4V*

[25] Umbrello, D.; "Finite element simulation of conventional and high speed machining of Ti6Al4V alloy"; *Journal of Materials Processing Technology*; vol. 196, pp. 79-87; 2008; ISSN 0924-0136.

[26] Molinari, A.; Musquar, C.; Sutter, G.; "Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V experiments and Modeling"; *International Journal of Plasticity*, vol.18, pp.443-459; 2002; ISSN 0749-6419.

[27] Hortig, C.; Svendsen, B.; "Simulation of chip formation during high-speed cutting"; *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 186, pp. 66-76; 2007; ISSN 0924-0136.

[28] Bäker, M.; Rösler, J.; Siemers, C.; "A finite element model of high speed metal cutting with adiabatic shearing"; *Computers and Structures*; vol.80, pp. 495-513; 2002; ISSN 0045-7949.

[29] Miguélez, H.; Soldani, X.; Muñoz, A.; Zaera, R.; "Simulación del corte a alta velocidad de la aleación Inconel 718"; *Actas del IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, pp.178-185; Las Palmas de Gran Canaria 2009; ISBN 978-84-692-8516-9.

[30] García Balsa, David; "Simulación mediante elementos finitos del comportamiento del material Inconel 718 en el mecanizado por torno a alta velocidad" Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, (2010).