

uc3m | Universidad **Carlos III** de Madrid

**ESTUDIO NUMÉRICO DE UN PROCESO DE
MECANIZADO APLICADO AL Ti-6Al-4V**

TFG GRADO INGENIERÍA MECÁNICA

2016/2017

Autor: *Rodrigo Jiménez de los Galanes Romero del Hombrebueno*

Tutor: *Xavier Soldani*

Índice

Índice.....	2
Índice figuras	3
Índice tablas	5
1 Objetivo del trabajo.	6
2 Introducción	7
2.1 Tipos de mecanizado.....	8
2.2 Componentes del mecanizado.....	9
2.3 Fases del mecanizado.....	10
2.4 Variables en el proceso de mecanizado:	11
3 Análisis de la viruta:	14
3.1 Tipos de generación de viruta	14
3.1.1 Viruta continua:.....	15
3.1.2 Viruta continua con borde.	16
3.1.3 Viruta discontinua	16
3.1.4 Viruta dentada.....	16
3.2 Estudio cinemático en corte ortogonal.....	17
3.3 Aleación Ti-6AL-4V	19
4 Simulación mediante Elementos Finitos	21
4.1 Geometría	22
4.1.1 Pieza a mecanizar	22
4.1.2 Herramienta	23
4.2 Condiciones de contorno	25
4.3 Ley de comportamiento de Johnson-Cook	26
4.4 Interacción viruta-herramienta.....	28
4.5 Criterio de fallo eliminación de elementos.	28
5 Resultados experimentales	30
5.1 Variación con Mass Scaling	36
5.2 Formación de viruta dentada.....	39
5.3 Variación de Temperatura máxima en función de la velocidad.....	42
6 Conclusión	45
7 Anexo	46
8 Bibliografía	56

Índice figuras

<i>Figura 2-1. Imágen corte ortogonal</i>	7
<i>Figura 2-2. Imagen Herramienta de abrasión</i>	8
<i>Figura 2-3. Movimientos en el proceso de corto</i>	11
<i>Figura 2-4. Velocidad de corte</i>	11
<i>Figura 2-5. Velocidad de Avance</i>	12
<i>Figura 2-6. Profundidad de Corte</i>	13
<i>Figura 3-1 Descomposición fuerzas en Corte Ortogonal</i>	17
<i>Figura 4-1. Sistema de Mallado</i>	21
<i>Figura 4-2. Zonas de mallado para la pieza a mecanizar</i>	23
<i>Figura 4-3. Ejemplo daño en Herramienta de Corte</i>	24
<i>Figura 4-4. Modelo de Herramienta</i>	24
<i>Figura 4-5. Conjunto modelo Pieza- Herramienta</i>	24
<i>Figura 4-6. Condiciones de contorno</i>	25
<i>Figura 4-7. Evolución de las fuerzas en función de Shear Failure de Jonhson-Cook. Valores estables de 2.5, 3, 3.5 y 4</i>	29
<i>Figura 4-8. Evolución de las fuerzas en función de Shear Failure de Jonhson-Cook. Valores inestables de 1,5 y 2 comparados con 3</i>	29
<i>Figura 5-1. Esquema y parámetros corte ortogonal</i>	30
<i>Figura 5-2. Valores estudios previos de Moliniari, Hoffmeister y Larbi</i>	31
<i>Figura 5-3. Presiones de corte VS Velocidad. Comparación con Hoffmister, Molinaire y Larbi</i>	32
<i>Figura 5-4. Grafico Fuerza VS Tiempo. Veloc= 5m/s</i>	32
<i>Figura 5-5. Fuerza longitudinal VS Velocidad para Avance de 0.12mm</i>	33
<i>Figura 5-6. Gráfico de Fuerza de corte VS Velocidad para Avance = 0.25mm</i>	35
<i>Figura 5-7. Variación Fc con Mass Scaling</i>	37
<i>Figura 5-8. Variación Fa con Mass Scaling</i>	38
<i>Figura 5-9. Ejemplo de índice de segmentación</i>	39
<i>Figura 5-10. Gráfica índice de segmentación, Avance 0.12 mm</i>	40
<i>Figura 5-11. Viruta Avance 0.12mm Veloc = 1 m/s</i>	40
<i>Figura 5-12. Viruta Avance 0.12mm Veloc = 15 m/s</i>	40
<i>Figura 5-13. Gráfica de índice de segmentación Avance 0.25mm</i>	41
<i>Figura 5-14. Temperatura alcanzada en simulación</i>	43
<i>Figura 5-15. Zoom para temperatura en Herramienta</i>	43
<i>Figura 5-16. Evolución de la temperatura con la velocidad</i>	43
<i>Figura 32. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 1 m/s</i>	46
<i>Figura 33. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 2 m/s</i>	46
<i>Figura 34. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 3 m/s</i>	47

<i>Figura 35. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 4 m/s.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 36. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 5 m/s.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 37. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 8 m/s.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 38. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 10 m/s.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 39. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 12 m/s.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 40. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 15 m/s.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 41. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 20 m/s.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 42. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 1 m/s.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 43. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 2 m/s.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 44. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 3 m/s.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 45. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 4 m/s.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 46. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 5 m/s.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 47. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 8 m/s.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 48. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 10 m/s.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 49. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 12 m/s.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 50. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 15 m/s.....</i>	<i>55</i>

Índice tablas

<i>Tabla 3-1. Propiedades Químicas de aleación Ti-6Al-4V</i>	20
<i>Tabla 3-2. Propiedades Mecánicas de aleación Ti-6Al-4V</i>	20
<i>Tabla 4-1. Datos de condiciones de contorno de geometría</i>	25
<i>Tabla 4-2. Propiedades del Material y de Herramienta</i>	25
<i>Tabla 4-3. Parámetros de Jonhson-Cook</i>	27
<i>Tabla 4-4. Valores del Shear Failure para las distintas zonas</i>	28
<i>Tabla 5-1. Deformaciones de viruta Avance = 0,12mm (1).</i>	34
<i>Tabla 5-2. Deformaciones de viruta Avance = 0,12 mm (2)</i>	34
<i>Tabla 5-3. Deformaciones de viruta Avance = 0,25mm (1)</i>	35
<i>Tabla 5-4. Deformaciones de viruta Avance = 0,25 (2)</i>	35
<i>Tabla 5-5. Comparación formación de viruta con variable Mass Scaling y sin ella</i>	37

Objetivo del trabajo.

Con el aumento de la utilización de diversas aleaciones de titanio y sus correspondientes mecanizados, y por los problemas encontrados en cortes a bajas velocidades, el fin principal de este trabajo fin de grado, es el de analizar en un proceso de torneado de piezas de titanio, en concreto la aleación Ti-6Al-4V, la evolución de la energía producida durante el mecanizado de la pieza, y la evolución de las fuerzas de corte en términos de velocidades de corte y desarrollo de virutas.

Para ello con ayuda de Abaqus, un programa de simulación y cálculos estructurales que utiliza el método de elementos finitos, se ha modelizado una pieza del material citado, y una herramienta cuya función será incidir sobre el material para producir el corte y eliminar el material deseado.

Se realizarán múltiples simulaciones a distintas velocidades de corte, distintos avances, y distintas condiciones de contorno para posteriormente analizar sus resultados en función de la energía, cantidad y forma de viruta, fuerzas de corte y fuerzas de avance.

Se analizará la distancia entre dientes y su relación con las velocidades de corte, así como la variación de la temperatura en términos relativos, a las distintas velocidades de corte.

El interés de realizar estos estudios es el de conseguir el mejor resultado posible con el mínimo número de ensayos en taller, para conseguir la pieza o geometría deseada.

Esto nos permitirá un ahorro económico en material, ya que podemos predecir la evolución que tomará la geometría del material a mecanizar, y la del daño producido en la herramienta, ya que sabremos cómo reducirlo.

También existe un gran interés en reducir el coste de tiempo empleado por personal con formación cualificada para desempeñar estos procesos en el taller.

Cuanto mayor sea la inversión realizada para dicho proceso, más justificado será un desembolso económico y tiempo para realizar estos estudios previos.

1 Introducción

El mecanizado es un proceso que consiste en obtener piezas con unas geometrías determinadas, gracias a la eliminación de material por arranque de viruta.

Se suele partir de una geometría sencilla como puede ser un cubo, el cual se ve sometiendo al proceso de mecanizado, en el que se va eliminando material para conseguir un producto final, o un producto semielaborado.

Denominamos producto semielaborado aquellos a los que tenemos que someterlos posteriormente a otros procesos distintos para conseguir el producto deseado.

En estos procesos se pueden mecanizar distintos tipos de materiales, ya sean aceros, aluminios, cerámicos, aleaciones etc...

El arranque de material, y consecuentemente la generación de viruta lo realiza el filo de la herramienta, y atendiendo al tipo de éste, podemos distinguir dos tipos:

- Arranque con filo geoméricamente determinado (Cepillado). Es un tipo de arranque para conseguir geometrías más específicas. Este tipo de arranque al ser más específico y preciso, es más costoso y laborioso, pero a la vez es el más utilizado por las fábricas

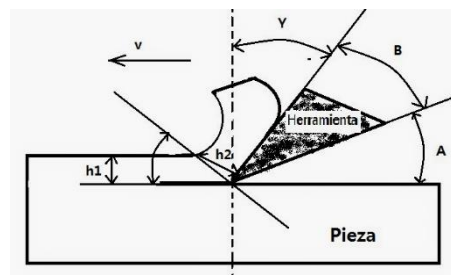


Figura 1-1. Imagen corte ortogonal

- Arranque con filo no determinado (rectificado). El material es eliminado por la actuación de un elemento abrasivo, el cual no tiene por qué tener una forma determinada.

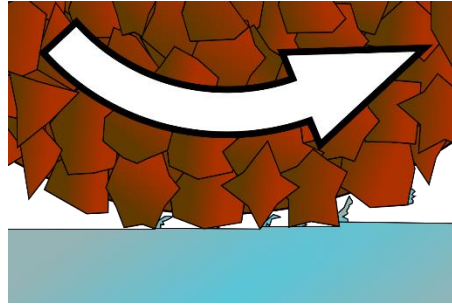


Figura 1-2. Imagen Herramienta de abrasión

1.1 Tipos de mecanizado.

En las operaciones de mecanizado, podemos encontrar distintos tipos de ellos, dependiendo del tipo de maquinaria, y del fin que busquemos en la pieza a trabajar.

- Torneado:

La máquina empleada para este proceso se denomina Torno, y en él se mecanizan piezas de revolución. Sus piezas finales presentan buenos acabados superficiales y con gran precisión.

El corte se produce mediante el movimiento de giro de la pieza. La herramienta se encuentra fija y es la encargada de ejecutar el movimiento de avance y de penetración para lograr la geometría deseada. De este modo se produce un corte continuo.

Se pueden mecanizar interiores o exteriores de las piezas, pero siempre de revolución.

- Fresado:

El arranque de material mediante fresado es ejecutado por una herramienta rotativa de forma circular y con numerosos filos de corte, a la cual denominamos fresa.

El fresado es un tipo de corte que se denomina discontinuo, ya que no todo el perímetro de la herramienta está realizando el corte, solamente cierta parte de la herramienta, y mientras tanto, la parte que no está en contacto con la pieza se encuentra en fase de refrigeración.

Debido a que el corte es discontinuo, también lo son las fuerzas, de modo que corremos el riesgo de presentar vibraciones en la herramienta y que puedan dañar a la pieza.

Las posibilidades que nos permite el fresado son muy amplias, algunas de ellas pueden ser acciones de: planeado, cajado, contorneado, escuadrado, taladrado, etc...

- Taladrado:

Consiste en la realización de agujeros pasantes, los cuales se realizan con una herramienta llamada broca, que puede ser portada por distintos tipos de máquinas como tornos, taladradoras, etc...

- Rectificado:

Está basado en la eliminación de material en forma de la viruta mediante un mecanismo abrasivo.

Permite elevadas velocidades de corte, y la viruta que se produce es microscópica y no controlada, pero nos facilita mucho el mecanizado de piezas que presentan un alto grado de dureza.

1.2 Componentes del mecanizado

El mecanizado se compone de partes o fases que podemos diferenciar:

- Máquina:

Sirven para soportar y equipar al conjunto de útiles y herramientas necesarios para el mecanizado de las piezas. Normalmente están compuestas por: bancada, sistemas de lubricación, mecanismo de accionamiento o motores, etc...

- Herramientas de corte:

Son las responsables de ejecutar el arranque de material en forma de viruta. Suelen tener características y propiedades específicas para conseguir evacuar rápidamente el calor producido por la fricción en el corte, han de ser duras para

tener una larga vida útil, y poseer una geometría determinada para conseguir evacuar la viruta de forma controlada.

- Sistema de sujeción:

Es importante que exista una unión sólida entre la herramienta y la pieza, y entre máquina y herramienta para disminuir al máximo las vibraciones y poder conseguir un buen acabado en el proceso de mecanizado.

1.3 Fases del mecanizado

En cuanto a las fases o procesos que se siguen en el mecanizado:

- **Movimiento de arranque de viruta:**

También denominado movimiento de corte. Es el que, sin existir avance, solamente es capaz de eliminar material durante una revolución.

- **Movimiento de avance:**

Unido al movimiento de arranque de viruta, son los responsables de la eliminación del material. Su movimiento es en dirección longitudinal de la pieza de revolución.

- **Movimiento de penetración:**

Es el que determina la cantidad de viruta a eliminar en función de la profundidad del corte.

- **Movimiento de aproximación.**

Es el único movimiento que no pertenece al proceso de eliminación de viruta, pero engloba todos los movimientos que realiza la pieza para llegar al lugar de corte.

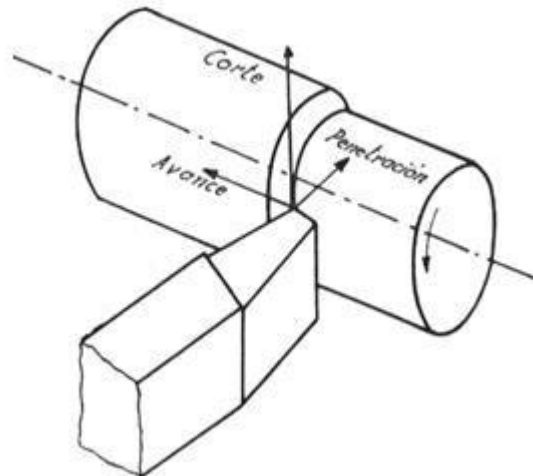


Figura 1-3. Movimientos en el proceso de corte

1.4 Variables en el proceso de mecanizado:

- Velocidad de corte:

A la velocidad de corte se la caracteriza como movimiento primario. Se denomina Velocidad de corte a la velocidad relativa que adquiere la herramienta en la dirección y sentido de movimiento de corte. Se mide en (m/min).

La velocidad de corte es una variable que depende de diversos factores; material de la herramienta, material de pieza a mecanizar, tipo de acabado que se busca, método de mecanizado...

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad (m/min)$$

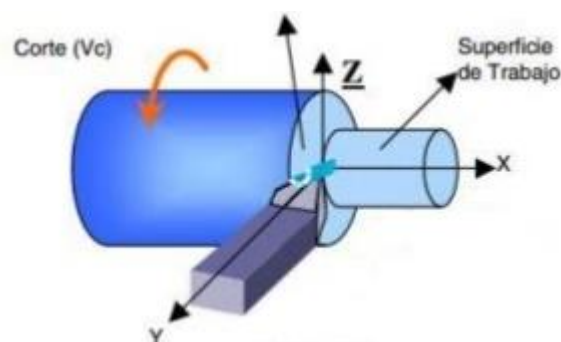


Figura 1-4. Velocidad de corte

- Avance:

Se denomina a la distancia que ha progresado la herramienta en dirección de la pieza, por cada revolución o carrera. Viene dada en (mm).

En cortes ortogonales, como en el que se estudia en este trabajo, el avance corresponde al desplazamiento relativo que existe entre herramienta y pieza.

El avance (F_n) resulta del producto del avance por diente (F_z), por el número de dientes (z).

$$F_n \left(\frac{mm}{rev} \right) = F_z \left(\frac{mm}{diente} \right) \cdot z \left(\frac{diente}{rev} \right)$$

- Velocidad de Avance:

La velocidad de avance está considerada como el movimiento de tipo secundario. Con la magnitud de avance y la velocidad de giro, podemos conocer la velocidad de avance que se deduce como el producto del avance por revolución, por la velocidad de rotación de la herramienta:

$$V_a \left(\frac{mm}{rev} \right) = F_n \left(\frac{mm}{rev} \right) \cdot n \left(\frac{rev}{min} \right)$$

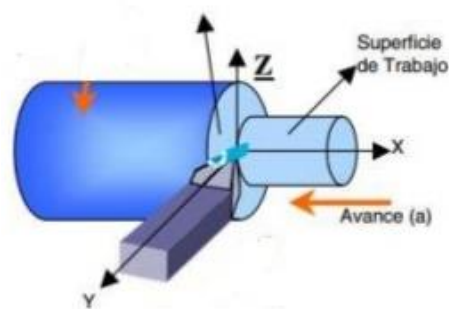


Figura 1-5. Velocidad de Avance

- Profundidad de corte:

Se denomina profundidad de corte a la distancia que penetra la herramienta en la pieza. Viene dada en (mm).

Si conocemos la profundidad de corte [p (mm)], y el avance [F_n (mm)], podemos conocer la cantidad de material que se elimina, la viruta (S) (mm^2).

$$S(\text{mm}^2) = F_n(\text{mm}) \cdot P(\text{mm})$$

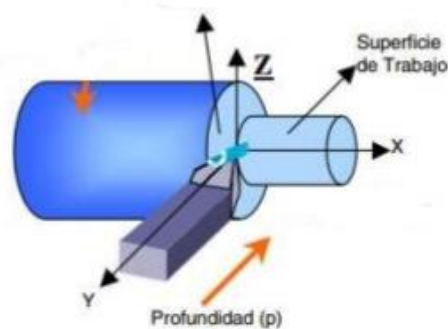


Figura 1-6. Profundidad de Corte

En el corte de tipo ortogonal, para comenzar el mecanizado, situaremos la herramienta por debajo de la superficie superior de la pieza, de modo que esa distancia que estamos por debajo de la superficie corresponderá al espesor de viruta (t_1) que obtendremos durante el proceso de mecanizado.

Esta viruta puede ir variando su espesor a medida que avanzamos en el mecanizado, incrementándose o reduciéndose a un valor (t_2).

La relación que encontramos entre estos dos valores es de:

$$r = \frac{t_1}{t_2}$$

2 Análisis de la viruta:

La morfología de la viruta de la aleación de titanio, está condicionada por una inestabilidad plástica durante el proceso de corte por la resistencia entre el ablandamiento térmico y el endurecimiento por el trabajo realizado en la zona de corte.

Vyas, Shaw y Hua J. Shivpuri en 2004 explicaron la segmentación de la viruta de la aleación de titanio por una grieta seguida de la propagación dentro de la zona de cizalladura primaria.

La presencia de bandas de cizalladura adiabática primaria no excluye la teoría de formación de virutas en forma de dientes por inicio de fisura.

Bai y Dodd, defienden que las bandas de corte adiabáticas son normalmente precedentes a las fracturas.

Las velocidades de corte (V_c) y la alimentación (f) son parámetros principales que controlan la frecuencia de corte durante la formación de viruta.

2.1 Tipos de generación de viruta

El efecto de la formación de viruta ha sido estudiando continuamente en todo el mundo. El gran interés e intentos de poder describir y predecir la morfología de la viruta en los cortes de aleaciones de titanio, los inició Johnson Cook en el 1953. Cook formuló una teoría termodinámica a base de la investigación del mecanizado de titanio en función de diferentes velocidades de corte.

Komanduri (1981), estudió los procesos de formación de viruta durante corte ortogonal del Ti-6Al-4V y formuló la conocida teoría de "chip catastrófico"

Más tarde Nakayama, Shaw y Vyas (1999) propusieron la teoría periódica de la formación de grietas en el mecanizado de acero duro.

Las investigaciones más recientes sobre la generación de viruta durante el corte fueron realizadas por Lee, Gente y Hoffmeister (2001)

Los encargados de la predicción mediante el modelado de elementos finitos de la morfología y la generación de viruta es gracias a J. Hua y R. Shivpuri. (2004)

La formación de viruta por cizallamiento es un proceso que se observa en un cierto intervalo de velocidades de corte. Este fenómeno se puede controlar reduciendo el nivel de las fuerzas y mejorando la evacuación de viruta.

Por lo tanto, el estudio de la morfología de viruta en el mecanizado de los metales, así como el desgaste producido en las herramientas correspondientes es de vital importancia.

Las virutas las podemos clasificar en 4 tipos:

- Viruta continua
- Viruta continua con borde
- Viruta discontinua
- Viruta dentada.

2.1.1 Viruta continua.

Suele ser la formada cuando mecanizamos materiales dúctiles. Producida con alta velocidad de corte, o con grandes ángulos de ataque registrados. La deformación de la viruta se produce a lo largo de una zona estrecha del corte, y la zona de cizalladura primaria, causadas por la fricción. Las virutas forman fuerzas cortantes secundarias en la zona del interfaz de la herramienta-viruta debido a la fricción.

Suelen producir un buen acabado superficial, pero siempre debemos intentar reducir la cantidad de viruta generada, ya que puede trastornar el proceso de mecanizado.

La viruta continua no es la más idónea siempre, existen algunos casos como las virutas generadas en CNC (Control Numérico Computarizado), que al ser continuas pueden envolverse en la herramienta o en el porta herramientas, de modo que se debe detener el proceso de corte para poder quitar esta viruta.

Una posible solución para este hecho, es colocar un dispositivo en la zona superior de la herramienta, que ayuda a la viruta a rizarse más estrechamente, golpeando a la pieza y rompiéndose.

2.1.2 Viruta continua con borde.

Es como el caso de la viruta continua, pero con la diferencia de que cuando se evacúa la viruta por la parte superior de la herramienta, hay algunas partículas pequeñas que se adhieren al borde de la herramienta.

Algunas de las condiciones para que se dé este caso son:

- Altas temperaturas
- Uniones metálicas
- Materiales dúctiles con altas tensiones
- Bajas velocidades
- Disminuir la profundidad de corte
- Incrementar el ángulo de inclinación
- Utilizar herramienta de corte afilada

2.1.3 Viruta discontinua

Esta variedad de viruta suele darse normalmente con materiales que, durante el mecanizado de la pieza, se producen pequeñas roturas, como es el caso del vidrio y silicio.

También podemos encontrarnos este caso en procesos de mecanizado con herramientas de corte que trabajan con pequeños ángulos de inclinación, grandes profundidades de corte, velocidades de corte lentas, o ausencia de lubricante o fluido de corte.

2.1.4 Viruta dentada.

Se producen en materiales semicontinuos, creadas durante las operaciones de mecanizado con altas y bajas tensiones de corte.

Este tipo de viruta suele estar presente en el mecanizado de piezas como metales, donde las fuerzas de corte disminuyen con la temperatura.

Por ejemplo, una aleación de titanio, como la que analizamos en este trabajo.

En función del tipo de segmentación y morfología observadas, determinarán el mecanizado y el desgaste de la herramienta durante este proceso.

La producción de viruta segmentada en el corte ortogonal de una aleación de Ti-6Al-4V, se analiza en profundidad mediante la modelización de elementos finitos

Los análisis dan resultados y predicciones de la frecuencia de segmentación y de la separación entre dientes, durante la formación de viruta dentada en función de la alimentación de la velocidad de corte y el avance.

Algunos estudios como Moliniari (1998) o Ockendon (1992) nos arrojan una predicción de que el ancho de la viruta varía como la inversa de la velocidad de corte.

2.2 Estudio cinemático en corte ortogonal

Un corte ortogonal es, cuando las posiciones relativas de la velocidad de la herramienta de corte, y la pieza a mecanizar son perpendiculares, produciendo una formación de viruta que será expulsada hacia arriba por el plano de la herramienta.

En un corte ortogonal puede existir un ángulo de inclinación de la herramienta. Jugando con este valor de ángulo, es el que nos hará conseguir que tengamos viruta de mayor espesor, y de menor longitud. En nuestro caso, ese ángulo es 0° .

En los cortes ortogonales, la fuerza total ejercida F , se encuentra comprendida en el plano normal al filo de la herramienta. Las fuerzas de corte que se producen en la pieza y en la herramienta, tienen la siguiente distribución:

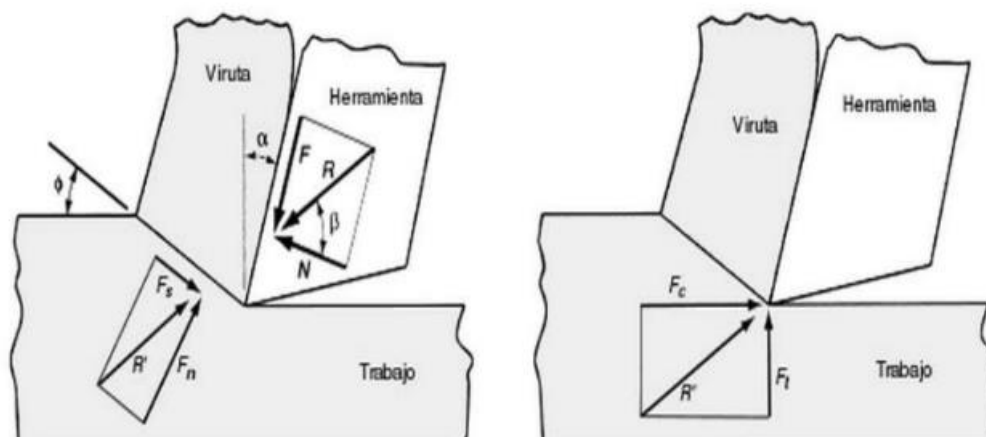
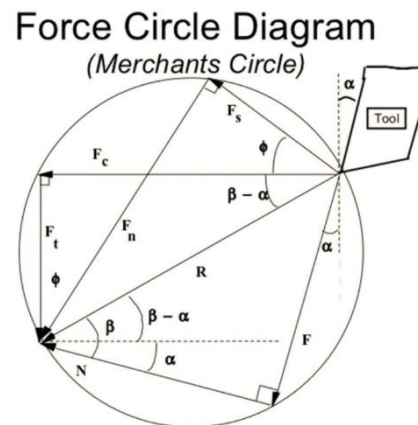


Figura 2-1. Descomposición fuerzas en Corte Ortogonal

Por lo tanto, en un proceso de mecanizado de corte ortogonal, solo tenemos dos fuerzas, la fuerza de corte (F_c), y la fuerza de avance (F_a).

En corte ortogonoal, la fuerza total F , se encuentra inscrita en el plano normal al filo de la herramienta.

Podemos descomponer la fuerza F , según 3 sistemas de fuerzas mediante el círculo de Merchant.



- Dirección del movimiento paralelo al corte y avance: F_t (F_c) y F_n (F_a).

$$F_t = F_c = F \cos(\tau - \gamma)$$

$$F_n = F_a = F \sin(\tau - \gamma)$$

- Plano de cizalladura y normal: F_s y F_{sn}

$$F_s = F \cos(\Phi + \tau - \gamma)$$

$$F_{sn} = F \sin(\Phi + \tau - \gamma)$$

- Superficie de la herramienta y normal: F_γ y $F_{\gamma m}$

$$F_\gamma = F \sin(\tau)$$

$$F_{\gamma m} = F \cos(\tau)$$

2.3 Aleación Ti-6Al-4V

El Ti-6Al-4V es la aleación de titanio más comúnmente utilizada. Consta de la aleación de dos fases, α y β , siendo el aluminio el estabilizador α , y el vanadio el β .

Sus principales características son, una buena resistencia a corrosión, debido a la formación de una película de óxido estable tras la exposición al oxígeno en aire o agua, y bajo peso.

Se produce un intenso desgaste, causado por las elevadas temperaturas que se alcanzan en el material provocado, por su baja conductividad térmica.

El titanio posee una alta reactividad química, que con el material cortado, produce una fuerte adhesión de la pieza de trabajo con la superficie de la herramienta.

Se sabe que la aleación es un material muy difícil de mecanizar y extremadamente complicado para cortar otros materiales. Una de las posibles razones es la baja conductividad térmica que posee, la cual da lugar a la presencia de altas presiones y temperaturas en la zona del "layer". (El layer pertenece a una zona muy delgada que se encuentra entre la pieza a mecanizar y la viruta)

Presenta inestabilidad plástica localizada en bandas de cizalladura adiabática y un gran desgaste de las herramientas producido por la fatiga y difusión.

Su bajo módulo elástico, disminuye rápidamente, incluso cuando estamos a temperaturas moderadas (204°C), lo que provoca deflexiones no deseadas en la pieza, sobre todo cuando se mecanizan piezas delgadas.

En cuanto a su capacidad de mecanizado, se recomiendan velocidades de corte bajas, y grandes cantidades de flujos de corte, ya que como veremos en los análisis más adelante, a altas velocidades de corte muchos materiales dan lugar a virutas muy segmentadas, presentado gran cantidad de "dientes afilados".

Estas segmentaciones afectan a los procesos de mecanizado, influyendo en las velocidades de corte y acabados rugosos en la superficie de la pieza.

Si fuese necesario la utilización de líquidos de corte, estos serían aconsejable que fuesen no clorados, con ello evitaremos posible contaminación por cloruro.

Su ámbito de aplicación es muy extenso, gracias a su bajo peso y alta resistencia es utilizado hoy en día en la industria aeroespacial como, por ejemplo, en turbinas de aviones, sistemas de amarres aeroespaciales o en el ámbito sanitario, como el caso de los dispositivos médicos... etc.

Una gran cantidad de estudios de las fuerzas de corte y formación de viruta con este material, se han tenido que llevar a cabo con velocidades de corte por debajo de los 5m/s.

	Arcam Typical	Ti6Al4V Required	Ti6Al4V Required**
Aluminio, Al	6%	5,5–6,75%	5,5–6,75%
Vanadio, V	4%	3,5–4,5%	3,5–4,5%
Carbon, C	0,03%	< 0,1%	< 0,08%
Hiero, Fe	0,10%	< 0,3%	< 0,3%
Oxígeno, O	0,15%	< 0,2%	< 0,2%
Nitrógeno, N	0,01%	< 0,05%	< 0,05%
Hidrogeno, H	0,00%	< 0,015%	< 0,015%
Titanio, Ti	Balance	Balance	Balance

Tabla 2-1. Propiedades Químicas de aleación Ti-6Al-4V

	Arcam Typical	Ti6Al4V Required	Ti6Al4V Required**
Yield Strength (Rp 0,2)	950 MPa	758 MPa	860 MPa
Ultimate Tensile Strength (Rm)	1020 MPa	860 MPa	930 MPa
Elongation	14%	>8%	>10%
Reduction of Area	40%	>14%	>25%
Fatigue strength* @ 600 MPa	>10,000,000 cycles		
Rockwell Hardness	33 HRC		
Modulus of Elasticity	120 GPa		

Tabla 2-2. Propiedades Mecánicas de aleación Ti-6Al-4V

3 Simulación mediante Elementos Finitos

El sistema de cálculo mediante el método de elementos finitos está basado en un método numérico con complejos cálculos algebraicos, como son; ecuaciones diferenciales parciales, integrales, y gran variedad de cálculos que resultan muy complejos y laboriosos a la hora de efectuarlos a mano, los cuales requieren mucho tiempo para su resolución.

Los ordenadores nos ayudan a realizar estos cálculos mediante distintos tipos de software, como por ejemplo en este caso, Abaqus.

Abaqus, es un programa que mediante el método de elementos finitos es capaz de dar una solución aproximada, ya que este método no puede proporcionar una solución exacta de un problema, por ejemplo, sólidos en contacto, problemas de mecánica de fluidos o de carácter térmicos, entre otros.

El método de ejecución consiste en, partiendo de un sólido sometido a distintas cargas o condiciones de trabajo, dividir la geometría en una gran cantidad de elementos, que en su conjunto denominamos malla. Estos distintos elementos estarán interconectados entre todos ellos mediante los nodos. De este modo se forma matemáticamente una matriz de rigidez, sobre la cual se llevarán a cabo los cálculos para dar con la solución al problema.

Cuanto mayor sea el número de elementos que componen la malla, más preciso será la solución obtenida, pero también más tiempo llevará al procesador realizar todas las operaciones matemáticas para poder arrojar una solución.

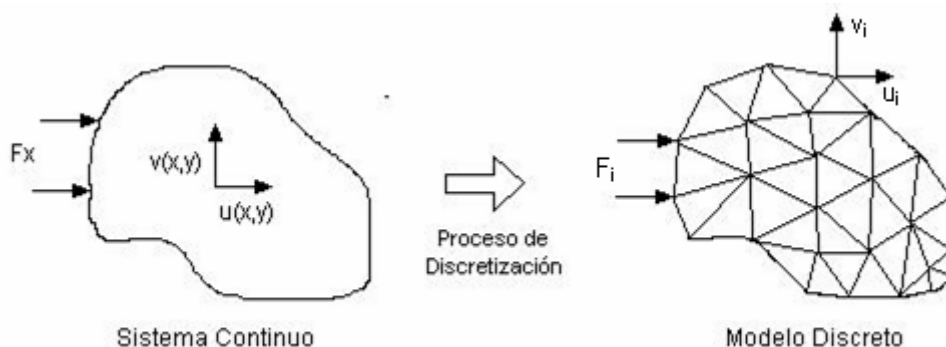


Figura 3-1. Sistema de Mallado

3.1 Geometría

Para realizar estos estudios, primero debemos realizar unos trabajos previos en Abaqus.

Estos procesos previos han consistido en diseñar un modelo numérico en el programa, de la pieza a mecanizar y de la herramienta. Una vez tenemos las geometrías y condiciones de contorno para el proceso de corte, se desarrolla el estudio del mallado.

Como ya sabemos, el tamaño del mallado influye mucho en el tipo de resultados que se obtendrán. Nosotros hemos comparado los resultados obtenidos con los previamente estudiados por otros científicos, y visto que la gran similitud que arrojan estas comparaciones se ha dado por válido el mallado creado.

3.1.1 Pieza a mecanizar

La geometría de la pieza empleada en la simulación de mecanizado es un prisma cuadrangular, cuyo material es la aleación de titanio Ti-6AL-4V.

Tiene una longitud de 2 mm, es una longitud suficientemente larga como para poder alcanzar régimen estacionario. En ella podemos diferenciar 4 zonas, las cuales se han mallado de distinta manera para intentar conseguir el resultado más preciso posible, pero atendiendo a la influencia de las variables en cada zona:

- Zona 1. Corresponde a la viruta que va a ser desprendida, tiene un espesor de t_1 , que es el avance que pongamos en cada simulación.
- Zona 2. Es la zona que denominamos "layer" y representa una capa muy fina que se encuentra entre la viruta desprendida y el material de la pieza a mecanizar restante.
- Zona 3. Denominamos a esta zona a la que se encuentra inmediatamente consecutiva al "layer", y, por ende, tendrá una gran influencia en cuanto a tensiones y disipación de calor.
- Zona 4. Corresponde al material a mecanizar que no será cortado. En esta zona el mallado tiene menor número de elementos, ya que las influencias de tensiones, temperaturas y fluencias, son menos significativas

Será considerado todo el conjunto como sólido isótropo, elástico visco-plástico.



Figura 3-2. Zonas de mallado para la pieza a mecanizar

3.1.2 Herramienta

La geometría de la herramienta, es la de una herramienta estandar, la cual tiene el filo en su extremo inferior izquierdo.

El material de la herramienta es acero duro, el cual posee propiedades con calidad muy elevada, como por ejemplo una buena resistencia a tracción, ($70-75 \text{ Kg/mm}^2$) y una dureza de 200-220 HB. Con estas propiedades puede ser considerado como indeformable.

En caso de utilizar otro tipo de material para la herramienta, se podría producir un desgaste prematuro, debido a las malas propiedades térmicas de las aleaciones de titanio, ya que la mayor parte del calor generado durante la presión ejercida en el corte, se concentra en una delgada zona.

Debido a que es en la punta de la herramienta donde se evacúa la mayor parte del calor generado, también se puede producir una rápida reacción química, siendo ésta la responsable del alto desgaste de la herramienta.

El desgaste que se produciría, no es el convencional de un cráter que se produce lejos de la punta de la herramienta, sino de un cráter localizado en la punta de la herramienta.

En nuestro análisis, al considerar que es acero duro, no se produce ningún tipo de desgaste o deformación en la herramienta.

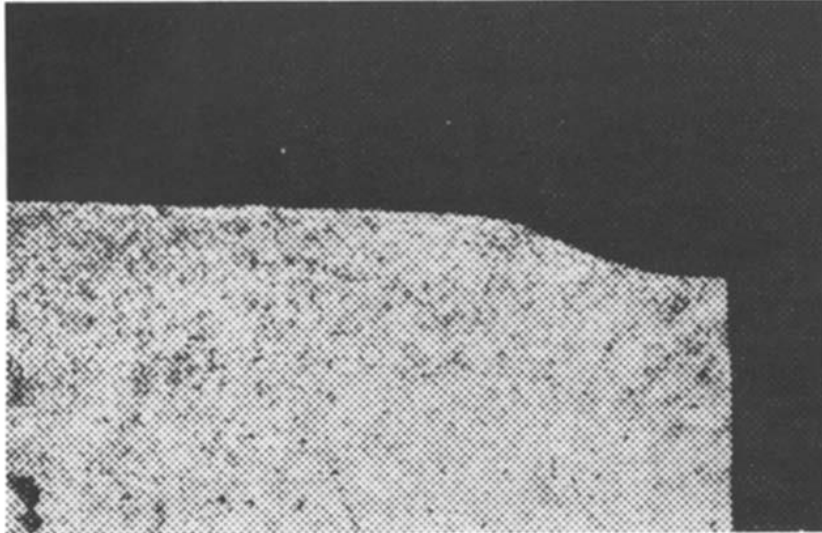


Figura 3-3. Ejemplo daño en Herramienta de Corte

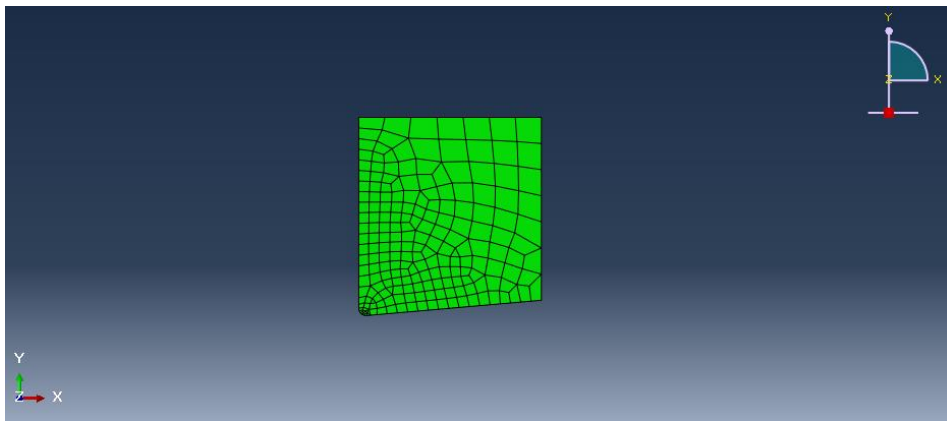


Figura 3-4. Modelo de Herramienta

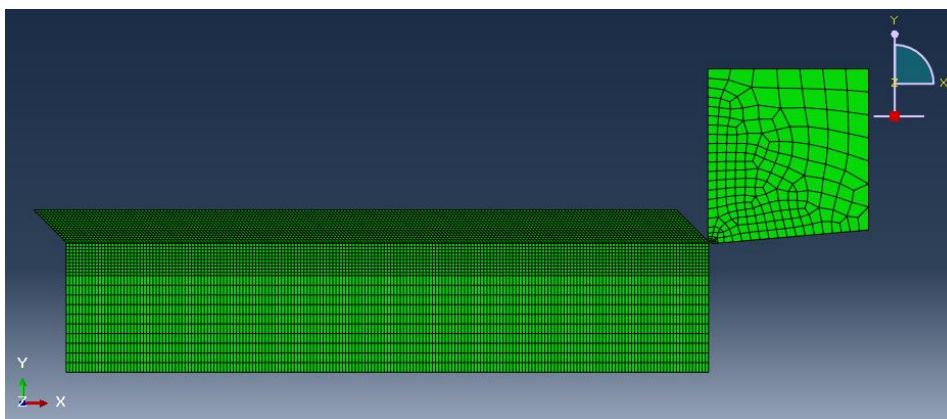


Figura 3-5. Conjunto modelo Pieza- Herramienta

3.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno de la simulaciones a realizar quedan resumidas en la siguiente imagen.

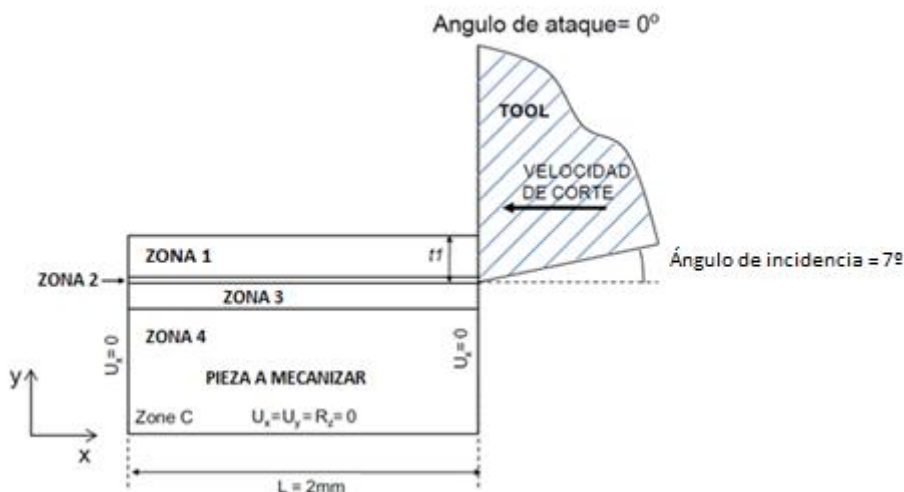


Figura 3-6. Condiciones de contorno

Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Longitud	Ángulo ataque	Ángulo incidencia
t1	4·10 ⁻³ mm	0,4 mm	0,4 mm	2 mm	0°	7°

Tabla 3-1. Datos de condiciones de contorno de geometría

Como podemos ver, la pieza a mecanizar está con restricción de movimiento, mientras que la herramienta se desplazará longitudinalmente en el eje x sobre la pieza, con una velocidad que irá variando en las distintas simulaciones.

<u>Propiedad</u>	<u>Herramienta</u>	<u>Material</u>
Conductividad térmica ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	33.5	7.2
Densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)	12700	4420
Módulo de Young ($N \cdot m^{-2}$)	500	114
Coefficiente de Poisson (<i>Adimensional</i>)	0.3	0.3
Coefficiente de Expansión ($^{\circ}C)^{-1}$)	-	9,2 · 10 ⁻⁶
Calor específico ($J \cdot (Kg \cdot K)^{-1}$)	234	560

Tabla 3-2. Propiedades del Material y de Herramienta

Como varía la velocidad, también debemos modificar el tiempo que ésta va a estar ejecutando el movimiento de corte, ya que según aumentemos la velocidad, menos tiempo tardará en recorrer la pieza completa.

Para ello se realiza una relación directa entre las simulaciones, si aumentamos la velocidad al doble, debemos reducir el tiempo a la mitad.

3.3 Ley de comportamiento de Johnson-Cook

Una ley constitutiva consta de un cúmulo de ecuaciones que tratan de detallar el comportamiento elástico de un material, en función de ciertas variables como la temperatura, deformación, velocidad y algunas constantes.

Tratar de definir una ley constitutiva que sea la más apropiada para las operaciones de mecanizado es algo que resulta muy complejo, debido a las grandes deformaciones y elevadas temperaturas que se dan lugar en el proceso de corte.

Por estos motivos nos basaremos en la ley constitutiva que formuló Johnson-Cook en 1983.

La ley formulada fue:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_f - T_0}\right)^m\right)$$

Siendo:

- $\varepsilon =$ Deformación plástica efectiva
- $\dot{\varepsilon} =$ Velocidad de deformación plástica efectiva
- $\dot{\varepsilon}_0 =$ Velocidad de deformación de referencia
- $T_f =$ Temperatura de fusión del material
- $T_0 =$ Temperatura ambiente
- $A =$ Límite elástico a temperatura ambiente en condiciones de baja velocidad de deformación.
- B y $n =$ Efectos de endurecimiento por deformación del material
- $C =$ Sensibilidad del material a la velocidad de deformación.
- $m =$ Sensibilidad del material a la temperatura.

Los valores que toman estas variables en nuestras simulaciones son:

A (MPa)	B (MPa)	n	m	Tº fusión (ºK)	T (ºK)	C
782	498	0.28	1	1673	293	0.028

Tabla 3-3. Parámetros de Jonhson-Cook

Esta ley es el módulo más usado a la hora de estudiar un proceso de corte, aunque también existen otras formulaciones como:

Ley de Latham-Cockroft: surgió para el criterio de daño, siendo también muy utilizada para predecir esfuerzos de tracción sobre la segmentación de la viruta en los procesos de mecanizado por corte ortogonal.

$$\int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_{max}}{\sigma_H} d\varepsilon_{pl} = C$$

Donde:

σ_{max} = Tensión principal máxima

σ_H = Tensión acuerdo a la hipótesis de Huber – Misses

ε_f = Deformación limite a fractura

ε_{pl} = Deformación plástica

C = Constante del material para criterio de fractura

Las condiciones de corte utilizadas, como las usadas por Madalina Calamaz fueron velocidades de corte entre 1 m/s y 3 m/s con espesor de viruta sin cortar de 0.1mm.

Todos los casos han sido estudiados para modelos de simulación en 2D, como los utilizados en este trabajo.

3.4 Interacción viruta-herramienta

El contacto entre la herramienta y la pieza mecanizada está descrito por la ley de Coulomb.

Un coeficiente de fricción constante e igual a 0.5 ha sido empleado en todas las simulaciones.

3.5 Criterio de fallo eliminación de elementos.

En las simulaciones no hemos empleado el módulo de daño, se ha empleado el criterio de *shear detention*. Este criterio consiste en la eliminación de elementos para hacer los cálculos más rápido. Estos elementos son eliminados cuando en la curva de tensión-deformación del material, se alcanza $\varepsilon = \varepsilon_{critica}$

Lo que hemos estudiado es, como varían las fuerzas si cambiamos este valor de eliminación de elementos en el layer para una misma velocidad.

Inicialmente tenemos los siguientes valores de *shear failure* para las distintas zonas:

Base del material	3.0
Viruta	6.0
Layer	3.0

Tabla 3-4. Valores del Shear Failure para las distintas zonas

En esta parte del cálculo se han cambiado los valores para la parte del *layer*, y poder ver cómo evolucionan los resultados de las fuerzas obtenidas.

En la *Figura 3-7*, podemos ver como las fuerzas de corte se mantienen con si variamos el valor entre 2.5 y 4.

Sin embargo si que observamos algunas variaciones en las fuerzas cuando lo analizamos con valores de 1.5 y 2. Se aprecian variaciones de picos muy bruscas que pueden ser debidas a una gran eliminacion de elementos, que provoca algunas inestabilidades en las presiones.

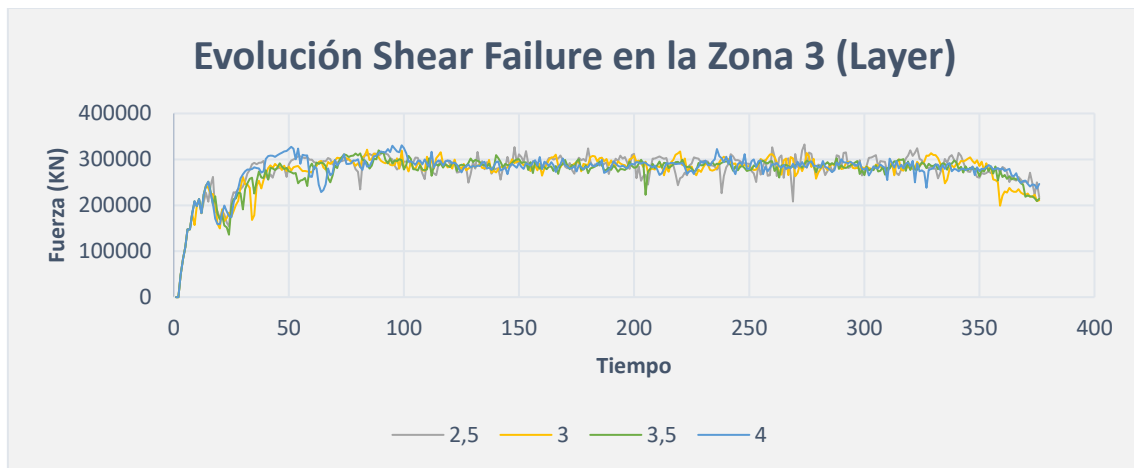


Figura 3-8. Evolución de las fuerzas en función de Shear Failure de Jonhson-Cook. Valores estables de 2.5, 3, 3.5 y 4

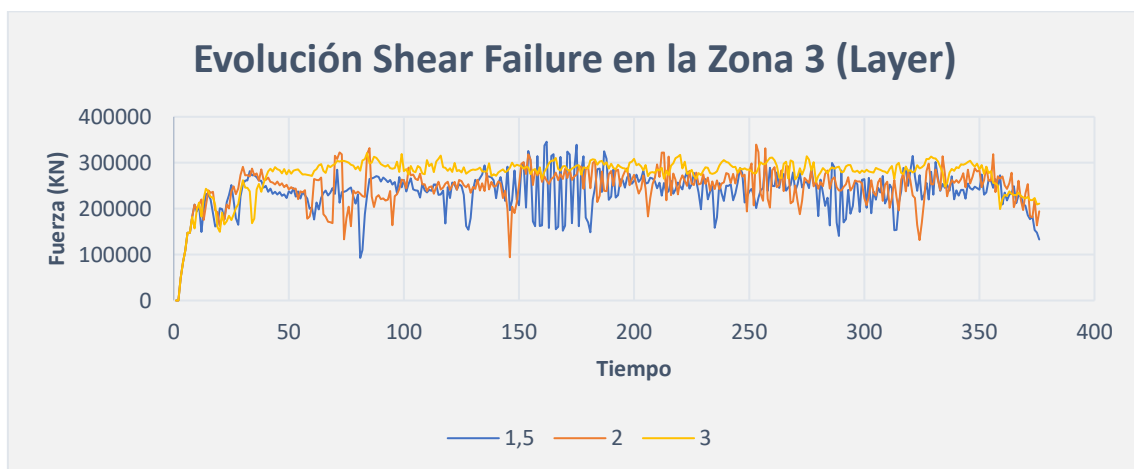


Figura 3-9. Evolución de las fuerzas en función de Shear Failure de Jonhson-Cook. Valores inestables de 1,5 y 2 comparados con 3

4 Resultados experimentales

Durante los procesos de corte que veremos en las imágenes a continuación, diferenciaremos dos etapas en la formación de viruta:

- Una primera fase, basada en la inestabilidad plástica y localización de la tensión en una banda estrecha, la cual induce al fallo de cizallamiento a lo largo de su superficie. La superficie se crea desde el comienzo de la herramienta, paralela al vector velocidad de corte, y comienza a curvarse gradualmente hacia arriba hasta que encuentra la superficie libre.
- La segunda fase acumula el incremento gradual de viruta debido al aplastamiento del material de trabajo en forma de cuña de la herramienta de avance.

El contacto inicial que se produce entre el inicio de la viruta que se comienza a crear en una cara de la herramienta, se da en el vértice de ésta. Esta fuerza de contacto va incrementándose a medida que aumenta la formación de viruta.

El contacto que existe entre la viruta que se está formando y la que se había formado anteriormente, hace que empuje a esta lentamente por la cara superior de la herramienta hacia arriba.

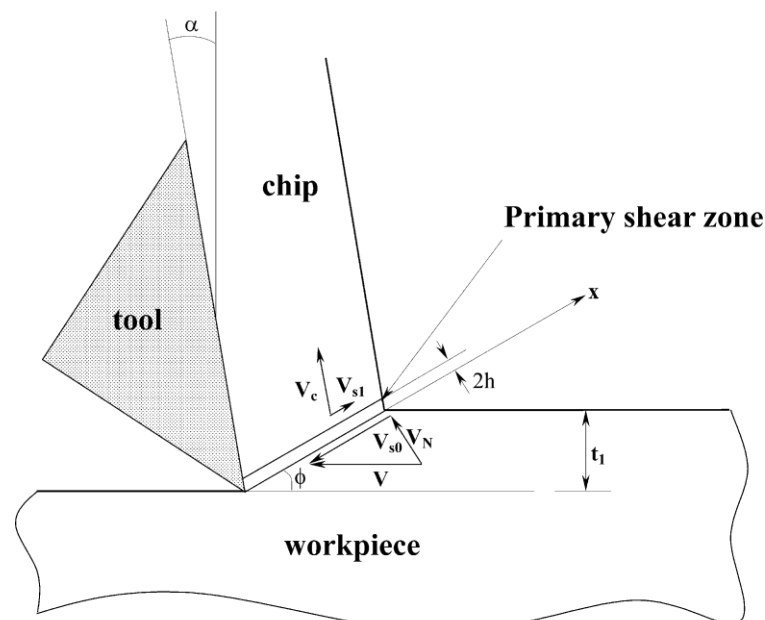


Figura 4-1. Esquema y parámetros corte ortogonal

En las simulaciones, se ha empleado para el material de la pieza una aleación de titanio, en concreto la (Ti-6Al-4V), cuyas características, composición química y principales aplicaciones ya han sido descritos anteriormente.

Las simulaciones están bajo condiciones cuasiestáticas, en las cuales el límite elástico nominal es $\sigma_e = 830 \text{ Mpa}$, con un 0,2% de deformación, por lo que $\sigma_m = 900 \text{ Mpa}$.

El rango de las velocidades de estudio está comprendido entre 1m/s y 80 m/s de modo que podremos comparar con los estudios realizados anteriormente por Hoffmeister, Moliniari y Larbi.

En la imagen veremos la comparación entre la velocidad de corte, y la presión de corte ortogonal. Esta presión de corte proviene del cociente resultante de dividir la fuerza de corte entre la profundidad por el espesor de viruta. Dicha presión es la ejercida sobre la herramienta.

Las condiciones de corte empleadas en la simulación son de: ángulo = 0° , espesor de viruta $t_1 = 0,12 \text{ mm}$ y $0,25 \text{ mm}$, ya que realizamos el estudio para los dos casos.

En todos los casos y para obtener unos resultados válidos en lo que concierne a la morfología de la viruta, han sido analizados para un mismo recorrido de la herramienta.

El motivo de elegir el método para seleccionar la misma distancia de recorrido de la herramienta y no por el tiempo, es porque, si lo analizamos en función del tiempo, como disponemos de distintas velocidades, no estaremos analizando el mismo instante en todas las simulaciones.

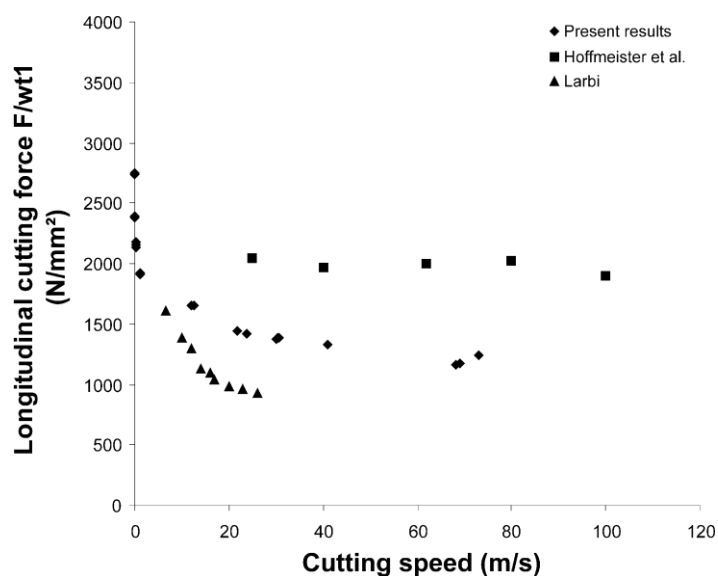


Figura 4-2. Valores estudios previos de Moliniari, Hoffmeister y Larbi

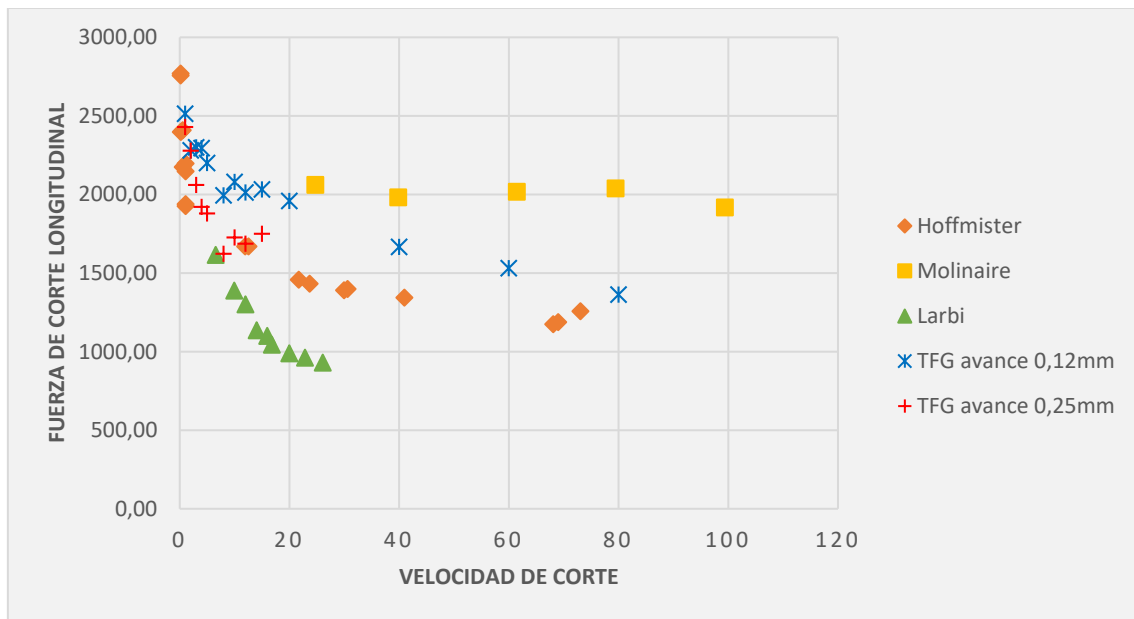


Figura 4-3. Presiones de corte VS Velocidad. Comparación con Hoffmister, Molinaire y Larbi

Para obtener un valor de la fuerza significativo, hemos estudiado la evolución de las fuerzas en función del tiempo en cada cálculo realizado a las distintas velocidades. Una vez obtenidos todos, realizamos la media eliminando los valores extremos que representan el inicio y final del corte, siendo valores que si los tuviéramos en cuenta alterarían en gran medida el estudio.

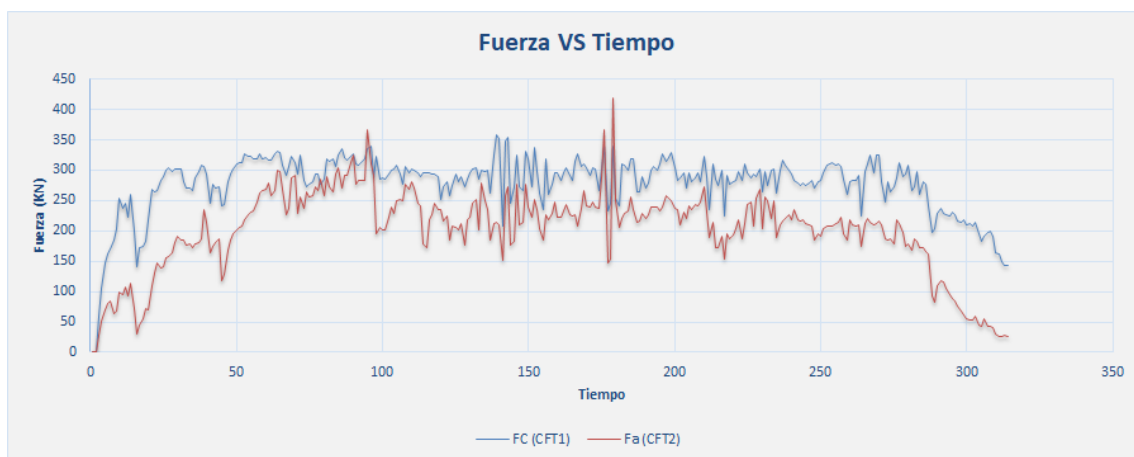


Figura 4-4. Grafico Fuerza VS Tiempo. Veloc= 5m/s

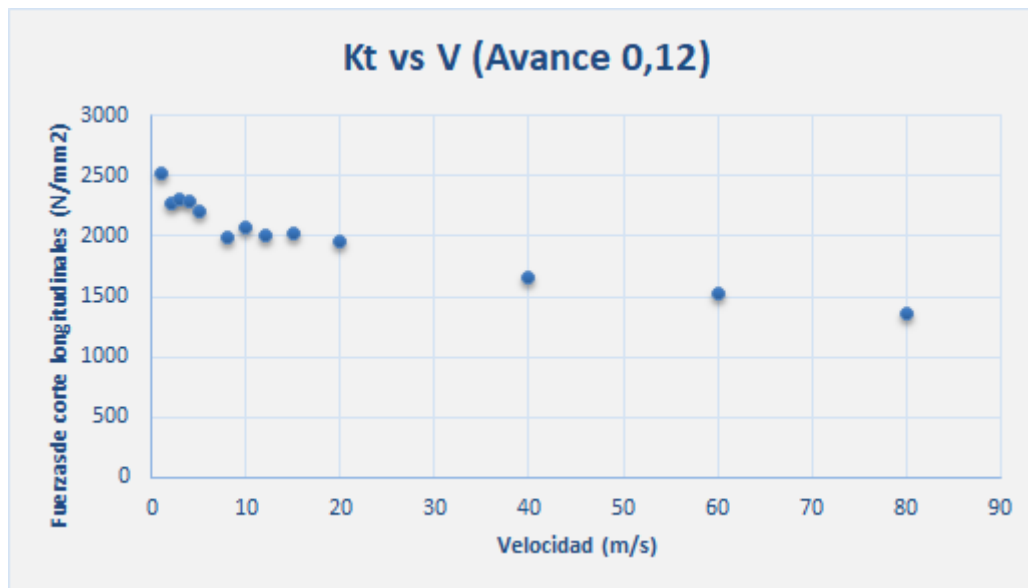


Figura 4-5. Fuerza longitudinal VS Velocidad para Avance de 0.12mm

En los estudios se aprecia una disminución de la fuerza en las primeras simulaciones de las distintas velocidades, incrementándose ligeramente y posteriormente estabilizándose a velocidades de 20 m/s en adelante.

Estas disminuciones de las fuerzas pueden ser debidas a una reducción del coeficiente de rozamiento entre el material y la herramienta. Dicha disminución es consecuencia del aumento de las velocidades de corte.

Los resultados obtenidos concuerdan con la tendencia mostrada por los estudios realizados anteriormente por Hoffmeister, Molinari y Larbi.

- Hoffmeister realiza ensayos en un rango de velocidades relativamente alto, entre 20 ms y 100 m/s, el cual, se muestra bastante estable, como el que hemos realizado nosotros en ese mismo rango de velocidades.
- Larbi se centra más en velocidades inferiores a 30 m/s y superiores a 5m/s, en los cuales observamos una disminución de la fuerza a velocidades bajas, y se aprecia un ligero comienzo de estabilización a medida que aumentamos la velocidad.
- Molinari realiza los ensayos en un campo más amplio de velocidades, el que se asemeja más al nuestro. Posee gran cantidad de datos de la fuerza para muy bajas velocidades, en el cual se muestra claramente los bruscos descensos de la fuerza y la posterior estabilización.

Se observó, que las bandas de cizalladura adiabática son la manifestación de una inestabilidades termo-mecánica, resultando en la concentración de grandes deformaciones de corte presentes en capas estrechas.

Esto se ve acompañado de un incremento local de la temperatura, que es una condición necesaria para que se produzca el cizallamiento adiabático.

Cuando se mecaniza un metal sometido a bajas tasas de deformación, en general, no muestra ningún tipo de corte adiabático, ya que la difusión de calor que presenta este material es elevada.

En las aleaciones de titanio, las bandas de cizalladura adiabática son beneficiadas por el bajo coeficiente de conductividad térmica.

Las tendencias de todos los estudios son similares y quedan claras, una disminución rápida a velocidades bajas y estabilización a más altas velocidades, pero no coincidimos con los estudios en el valor de la fuerza. Esto es debido a distintos factores a la hora de los cálculos, como distinto ángulo de inclinación, utilización de herramientas geoméricamente y/o de materiales distintos.

Nuestras condiciones son las más parecidas a las empleadas por Moliniari, de ahí, que los datos sean similares.

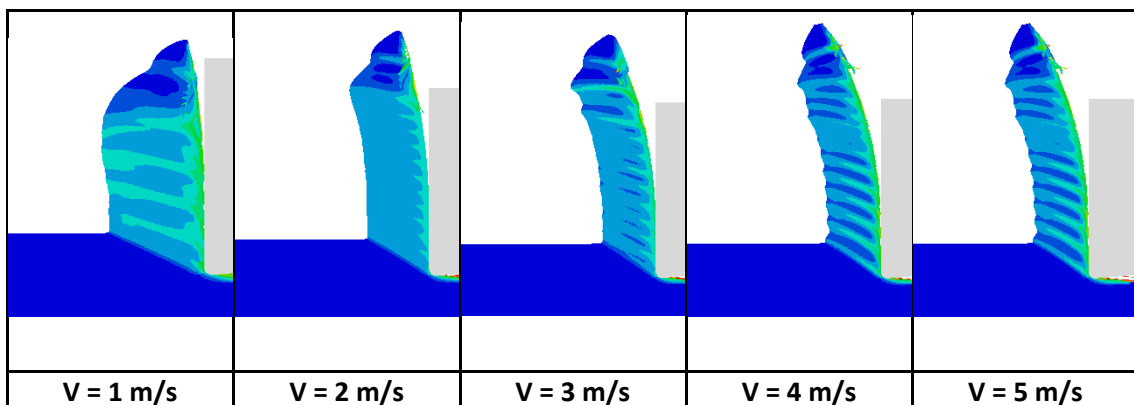


Tabla 4-1. Deformaciones de viruta Avance = 0,12mm (1).

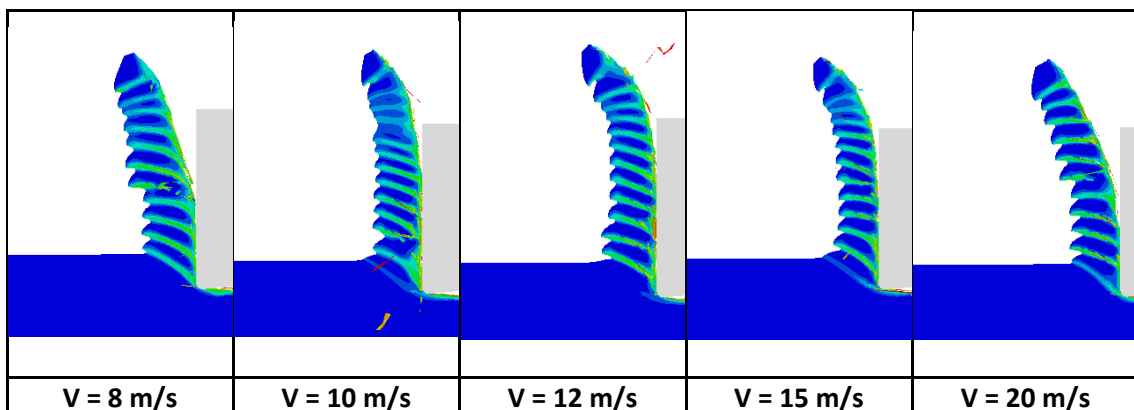


Tabla 4-2. Deformaciones de viruta Avance = 0,12 mm (2)

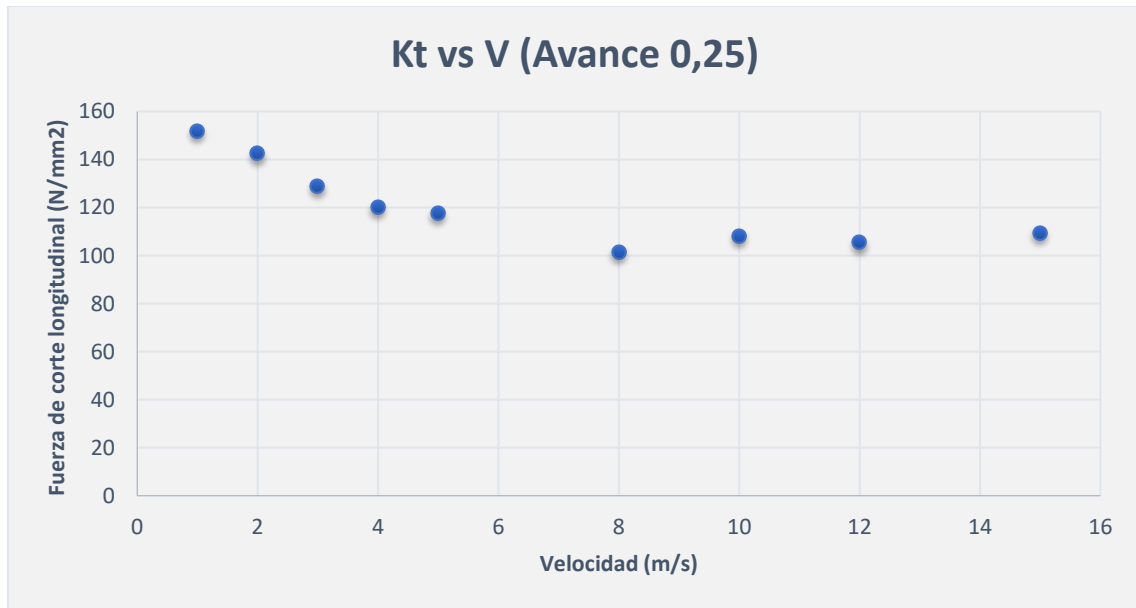


Figura 4-6. Gráfico de Fuerza de corte VS Velocidad para Avance = 0.25mm

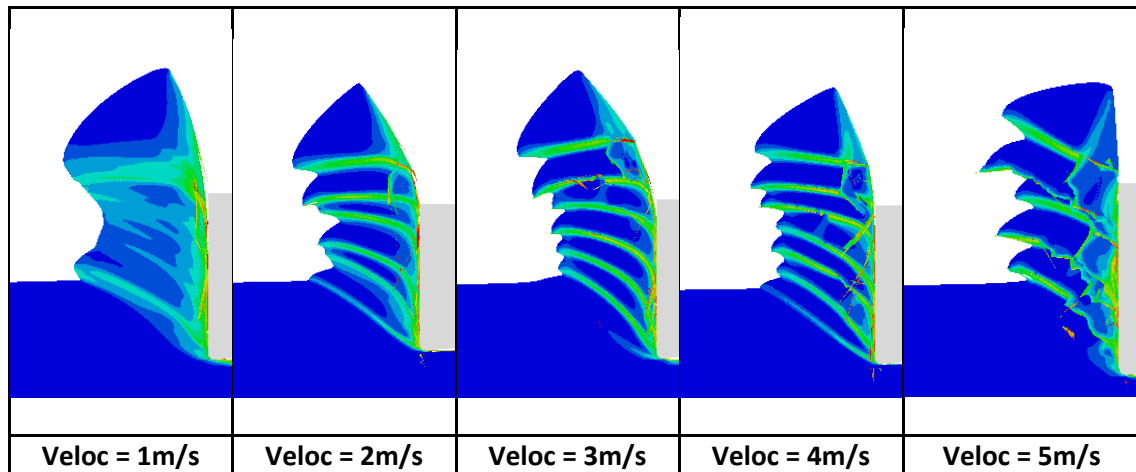


Tabla 4-3. Deformaciones de viruta Avance = 0,25mm (1)

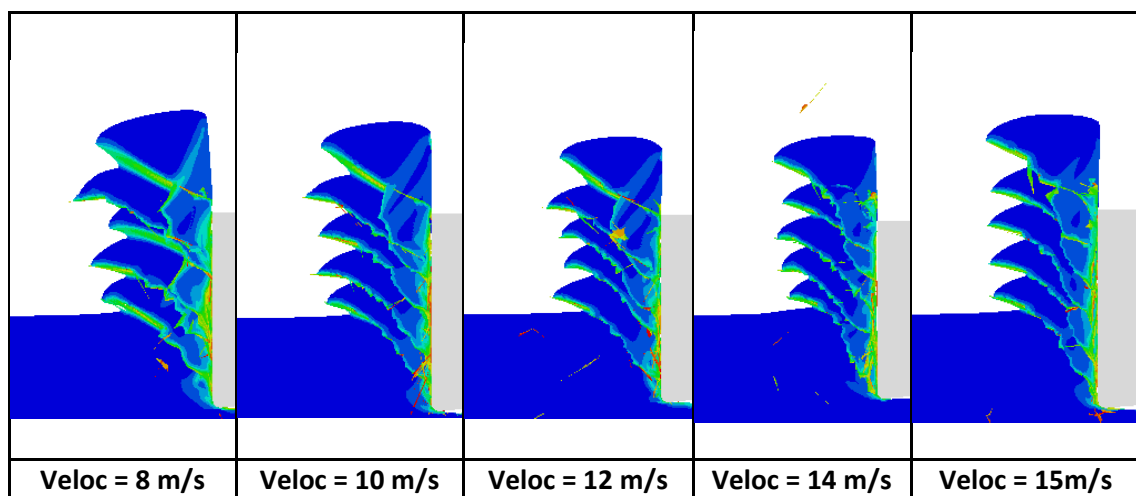


Tabla 4-4. Deformaciones de viruta Avance = 0,25 (2)

4.1 Variación con Mass Scaling

El procedimiento de cálculo explícito de dinámica es utilizado para resolver principalmente dos tipos de problemas: cálculo de respuesta dinámica que sea transitoria, y simulaciones cuasiestáticas que impliquen efectos no lineales complejos. Comúnmente son problemas que implican condiciones de contacto complejas.

Como el método de diferencia explícito es utilizado para integrar ecuaciones en función del tiempo, la matriz discreta de la masa utilizada en las ecuaciones de equilibrio juega un papel crucial, tanto como para la agilidad del ordenador a la hora de efectuar los cálculos, como en la precisión de los mismos.

Cuando aplicamos correctamente el mass scaling, seguramente mejoremos la eficiencia del ordenador, dándole capacidad para realizar los cálculos de una manera más rápida, pero conservando un alto grado de precisión en los cálculos.

Nosotros hemos aplicado el mass scaling en todos los cálculos que se encuentran en el rango de velocidades desde 1m/s hasta 15 m/s, tanto para los efectuados con avance 0,12 mm como para los de avance 0,25 mm. Se ha decidido aplicarlo en estos cálculos para conseguir reducir el tiempo de procesamiento, ya que, a velocidades bajas, el tiempo de cálculo se hacía extremadamente largo.

Los únicos casos en los que no lo hemos aplicado, han sido en las velocidades de entre 20 m/s y 80 m/s, ya que consideramos que el tiempo de cálculo empleado por el ordenador no era demasiado alto sin aplicar este método.

A continuación, se muestra la comparativa de la variación de los resultados en las velocidades de 20, 40, 60 y 80 m/s con el valor de mass scaling y sin él.

	V = 20 m/s	V = 40 m/s	V = 60 m/s	V = 80 m/s
CON MASS SCALING				
SIN MASS SCALING				

Tabla 4-5. Comparación formación de viruta con variable Mass Scaling y sin ella

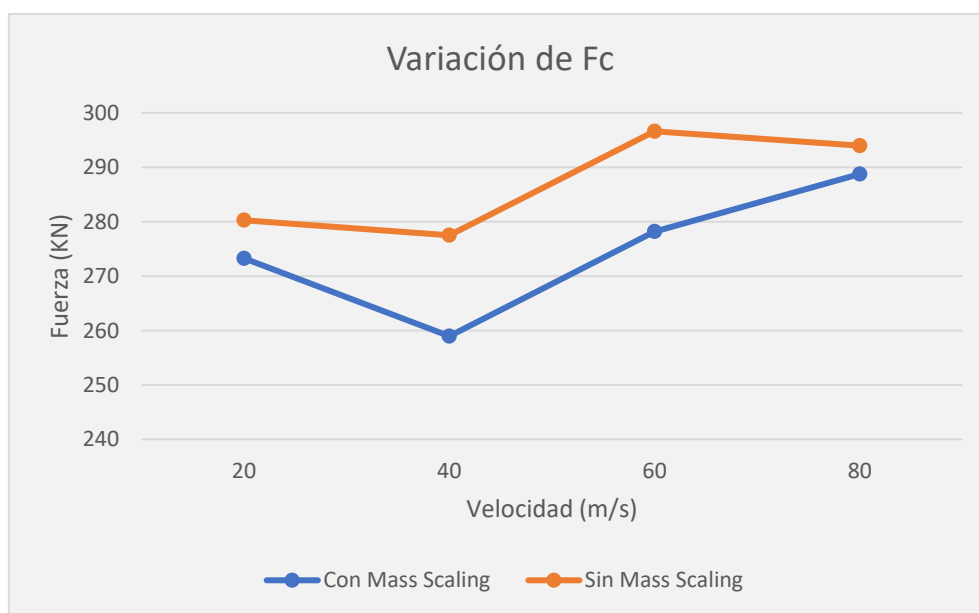


Figura 4-7. Variación Fc con Mass Scaling

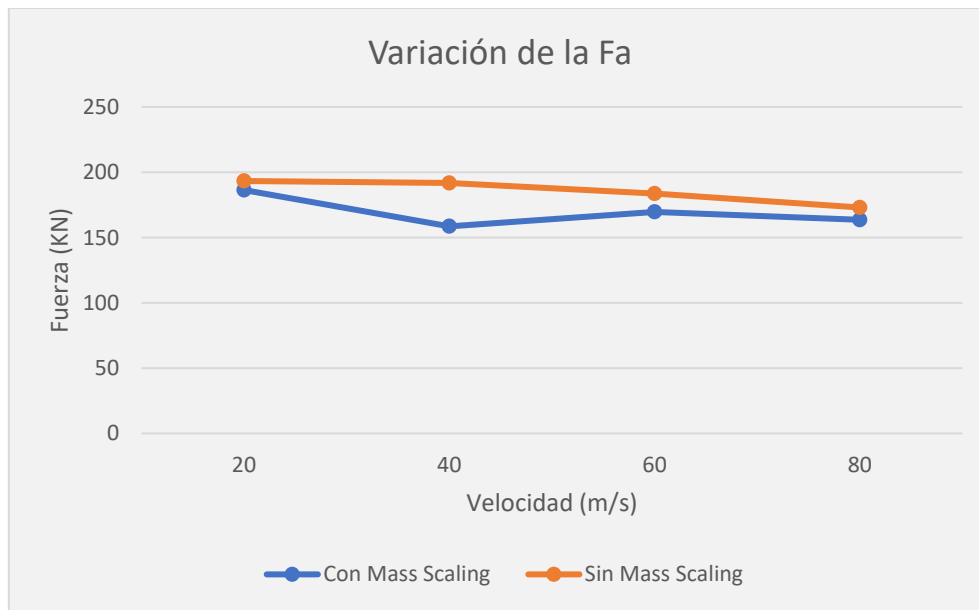


Figura 4-8. Variación Fa con Mass Scaling

Como podemos ver en las gráficas, las variaciones existen realmente, pero a medida que las velocidades de corte son más bajas, esta diferencia es menor, por lo que se pueden dar por válidos los resultados obtenidos para lograr agilizar los cálculos.

Pero nunca debemos olvidar, que se pierde precisión en el cálculo debido a la variable Mass Scaling.

4.2 Formación de viruta dentada

Como podemos ver, en algunas de las imágenes de las simulaciones para ambos casos, comprobamos que, a medida que aumentamos las velocidades, la viruta se vuelve más dentada o serrada. Así podemos ver una viruta uniforme y prácticamente sin ninguna formación de diente en las velocidades más bajas, como las de 1 m/s. Por otro lado, a las velocidades más altas observamos virutas con gran número de dientes, un aspecto muy serrado y una gran inestabilidad por cizallamiento.

En este cálculo relacionamos el índice de segmentación (S_i), con las distintas velocidades.

El índice de segmentación (S_i), es un cociente que relaciona los valles de los dientes mediante la siguiente ecuación.

$$S_i = \frac{t_2^+ - t_2^-}{t_2^+}$$

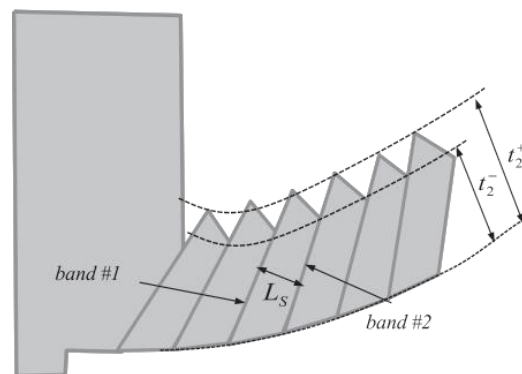


Figura 4-9. Ejemplo de índice de segmentación

La morfología de la viruta tiene cuatro parámetros o variables que los podemos identificar como:

- Separación entre las bandas de cizallamiento
- Inclinación de la banda de corte
- Máximo espesor de viruta
- Mínimo espesor de viruta

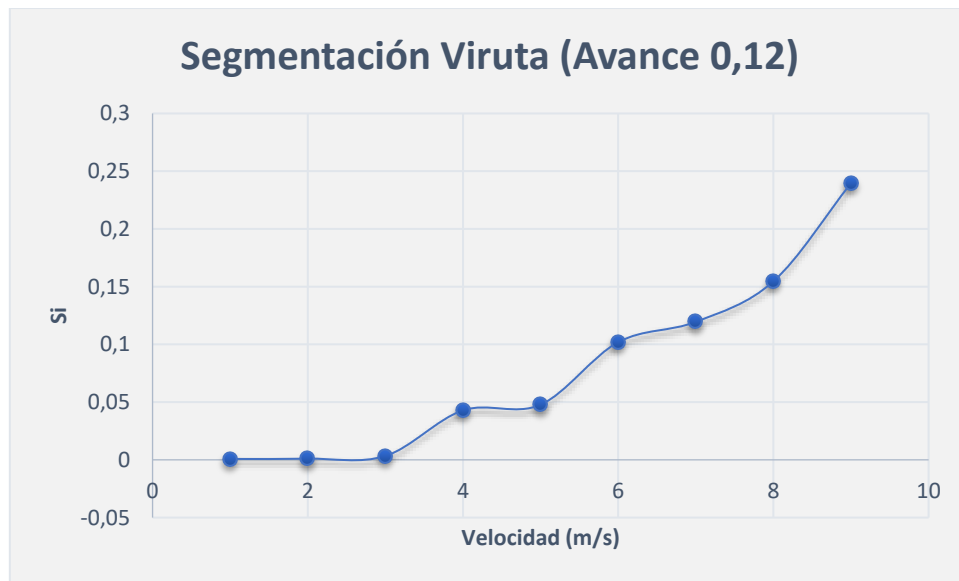


Figura 4-10. Gráfica índice de segmentación, Avance 0.12 mm

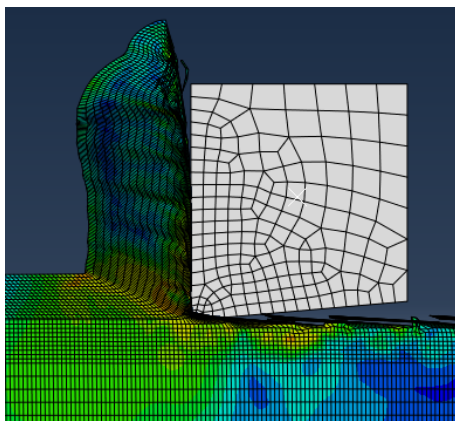


Figura 4-11. Viruta Avance 0.12mm Veloc = 1 m/s

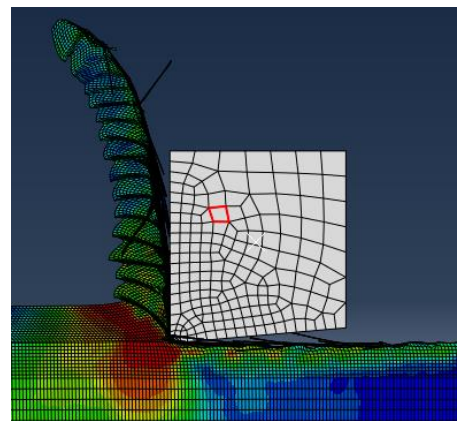


Figura 4-12. Viruta Avance 0.12mm Veloc = 15 m/s

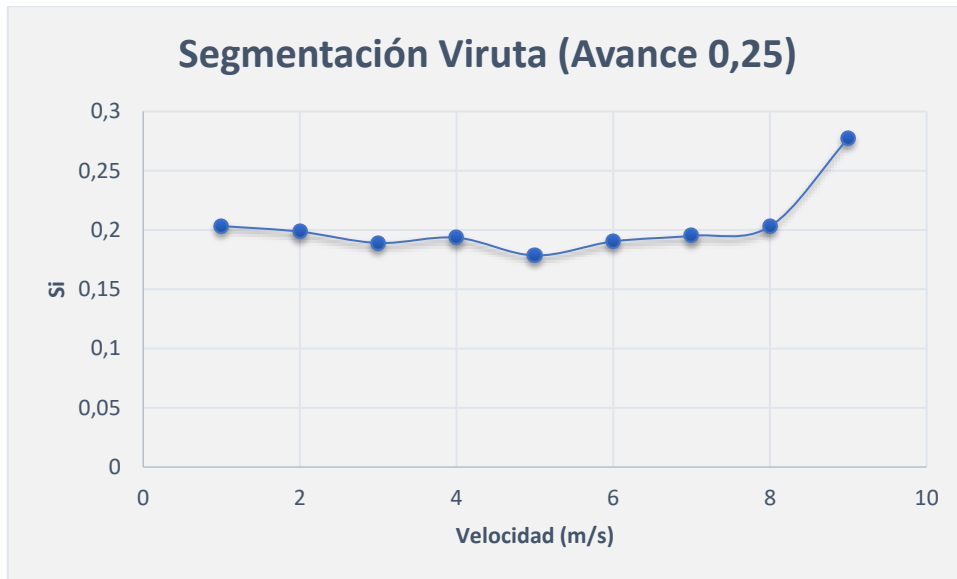


Figura 4-13. Gráfica de índice de segmentación Avance 0.25mm

En ninguna de nuestras simulaciones se ha dado el caso de que la viruta se partiera o segmentara en varias partes, (exceptuando partículas muy pequeñas que en alguna simulación si han salido arrojadas a gran distancia). Este hecho se dará con mayor facilidad cuanto más alta sea la velocidad de corte.

Como se puede apreciar en las gráficas del índice de segmentación, y viendo la morfología de la viruta para los valores de avance de 0,25 mm, desde la velocidad más baja de 1m/s ya tenemos creación de diente o de inicio de viruta serrada. Esto es debido a que el espesor de la viruta, que coincide con el avance, es mayor, y por lo tanto, tiene más cantidad de material que evacuar, lo que produce estos valles que dan lugar a la tipología de viruta serrada o dentada.

También observamos que para las virutas originadas por avances más bajos, generan virutas más alargadas y finas, mientras que si aumentamos el avance, conseguimos virutas más gruesas y cortas.

4.3 Variación de Temperatura máxima en función de la velocidad

El análisis de la evolución de la temperatura es algo que no podemos extender de forma global, ya que, al ser un estudio dinámico, intervienen muchos factores que impiden que creamos una ley o tendencia generalizada.

Pero sí podemos realizar un análisis relativo con las simulaciones realizadas en este trabajo, por considerar mismas condiciones geométricas y de contorno, en cada uno de los cálculos.

La metodología empleada para el análisis de la evolución de la temperatura a lo largo de las distintas simulaciones, ha sido similar a la empleada para la deformación de la viruta en apartados anteriores.

Seleccionamos un instante del proceso de corte, en este caso, ha sido a mitad de recorrido, ya que es cuando se observan las mayores temperaturas alcanzadas en el proceso de corte. Si observamos la primera etapa, la temperatura máxima alcanzada es baja, y se va incrementando a medida que avanza la herramienta, obteniendo una temperatura máxima cerca de la mitad del proceso, y manteniéndose más o menos constante hasta el final.

Una vez seleccionado el instante a observar, Abaqus nos devuelve un informe en el cual nos indica la máxima temperatura en este instante y el punto en el que se está dando, así como el gradiente de temperatura en las zonas limítrofes.

Los análisis simplificados en la figura 4-16, corresponden a los estudiados para avance de 0.12 mm y velocidades comprendidas entre 1 m/s y 80 m/s.

Podemos observar cómo se produce una tendencia al incremento de la temperatura en función de la velocidad, estabilizándose a partir de los 10 m/s aproximadamente.

Este incremento de temperatura, como hemos explicado anteriormente en la introducción, es debido al aumento de fricción y a la deformación plástica de cortadura. Esta fricción se ve incrementada a medida que aumentamos las velocidades, y provoca la elevación de temperatura que consecuentemente, produce un incremento de desgaste del filo de la herramienta.

A medida que se van elevando las velocidades de corte, la herramienta dispone de menos tiempo para poder evacuar el calor generado por la fricción, de modo que esta temperatura se ve incrementada.

La zona donde se identifica la mayor temperatura está localizada entre el ápice de la herramienta y la arista continua sobre la que desliza la viruta hacia arriba, lo que produce ablandamiento del material, con su consecuente incremento en fluidez. Esto tiene sentido, ya que el método de evacuación de calor es por conducción, y si la viruta es la que se evacúa con calor, entra en contacto con la zona inmediatamente superior al ápice de la herramienta, la que al cabo de cierta distancia recorrida acumula el calor de toda la longitud mecanizada.

La posible solución para reducir estas altas temperaturas, que en la mayoría de casos son no deseadas, residen en aplicar un fluido refrigerante y a la vez lúbricamente, como puede ser taladrina.

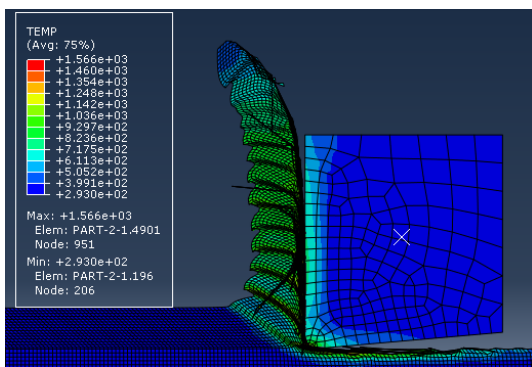


Figura 4-14. Temperatura alcanzada en simulación

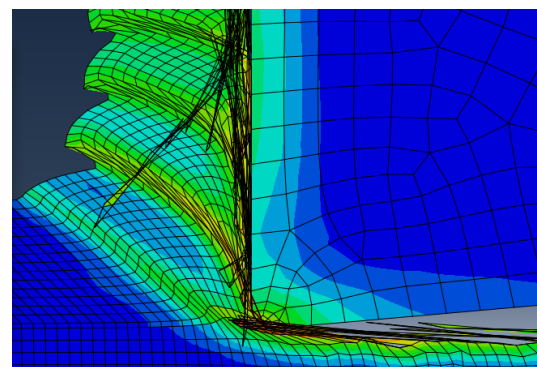


Figura 4-15. Zoom para temperatura en Herramienta

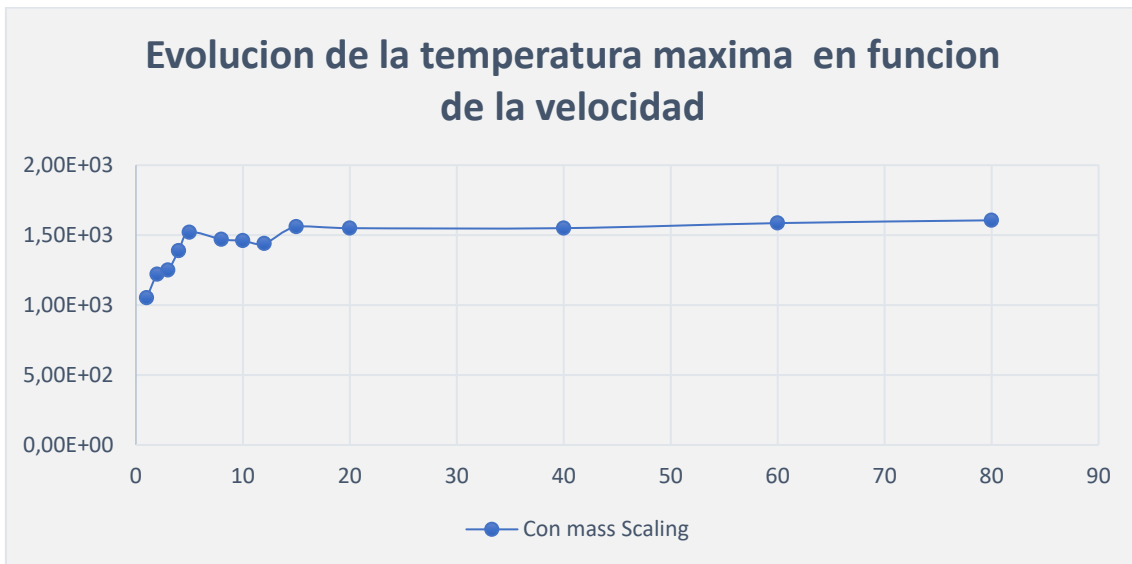


Figura 4-16. Evolución de la temperatura con la velocidad

Ahora que hemos visto cómo evolucionan las presiones específicas de corte y la evolución de la temperatura a las distintas velocidades de corte, podemos determinar que tienen una gran relación.

Las fuerzas de corte comienzan siendo elevadas y disminuyen bruscamente hasta la velocidad de unos 10 m/s y posteriormente estabilizándose en un valor casi constante. Con la temperatura, acabamos de ver que ocurre justo lo contrario, tenemos un brusco incremento al principio hasta los 10 m/s, y luego la misma estabilización encontrada en el estudio de las fuerzas de corte hasta los 80 m/s.

Así, podemos determinar la relación directa e inversamente proporcional entre ambos factores estudiados.

5 Conclusión

El fin de este trabajo era el de analizar ciertos parámetros que surgen de los procesos de corte ortogonal de una aleación de titanio, en concreto la Ti-6Al-4V. Para ello se ha diseñado un modelo de elementos finitos con el software de Abaqus, que nos proporciona los resultados en las distintas condiciones de trabajo que le hemos indicado.

Los datos obtenidos han sido de geometría, presiones de corte y temperatura alcanzada en el proceso de corte, y las variables que se han modificado en las distintas simulaciones han sido el avance de la herramienta, y la velocidad de corte. En base a estas situaciones se ha podido observar las siguientes tendencias:

La influencia de la velocidad de corte en la geometría de la viruta varía incrementando el número de dientes o valles a medida que se eleva la velocidad de corte. Esto también provoca mayor inestabilidad de la viruta y menor control de ella, pudiendo llegar en algún caso a la fragmentación de la misma, si la velocidad de corte fuese lo suficientemente elevada.

En cuanto a la presión de corte, se observa la gran influencia que tiene la variación de la velocidad de corte en esta variable. Podemos ver que rápidas y bruscas disminuciones a medida que se incrementa la velocidad de corte, que se estabilizan una vez se alcanza velocidades cercanas a los 10 m/s.

La última variable analizada de la temperatura se comporta a la inversa de las presiones, lo cual tiene sentido, ya que cuando tenemos bajas velocidades de corte, las fuerzas de fricción serán también bajas, lo que nos produce elevadas temperaturas. Si las velocidades aumentan, consecuentemente aumentan las fuerzas de fricción y la temperatura. Así, podemos ver una curva totalmente contraria a la de la evolución de las presiones de corte.

Con estos estudios y resultados obtenidos, ya podemos tener una base sobre la que apoyarnos para poder determinar las condiciones de corte de este material, en base a la finalidad de uso que vaya a tener, logrando reducir los costes por los trabajos de ensayo-error que tienen lugar en los laboratorios.

6 Anexo

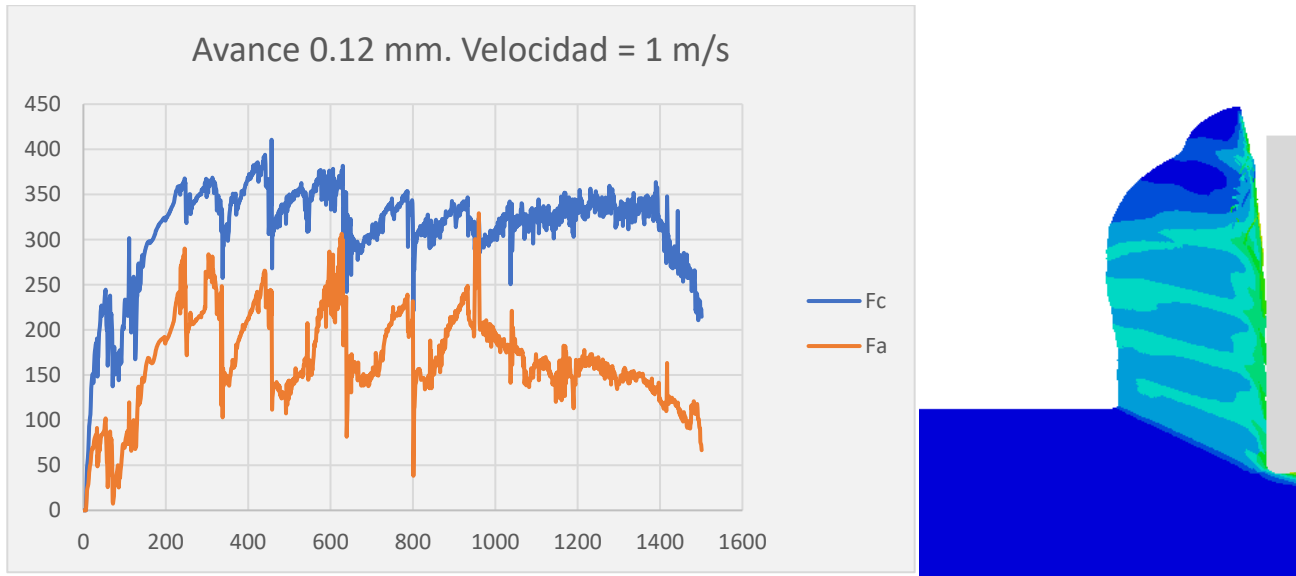


Figura 17. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 1 m/s

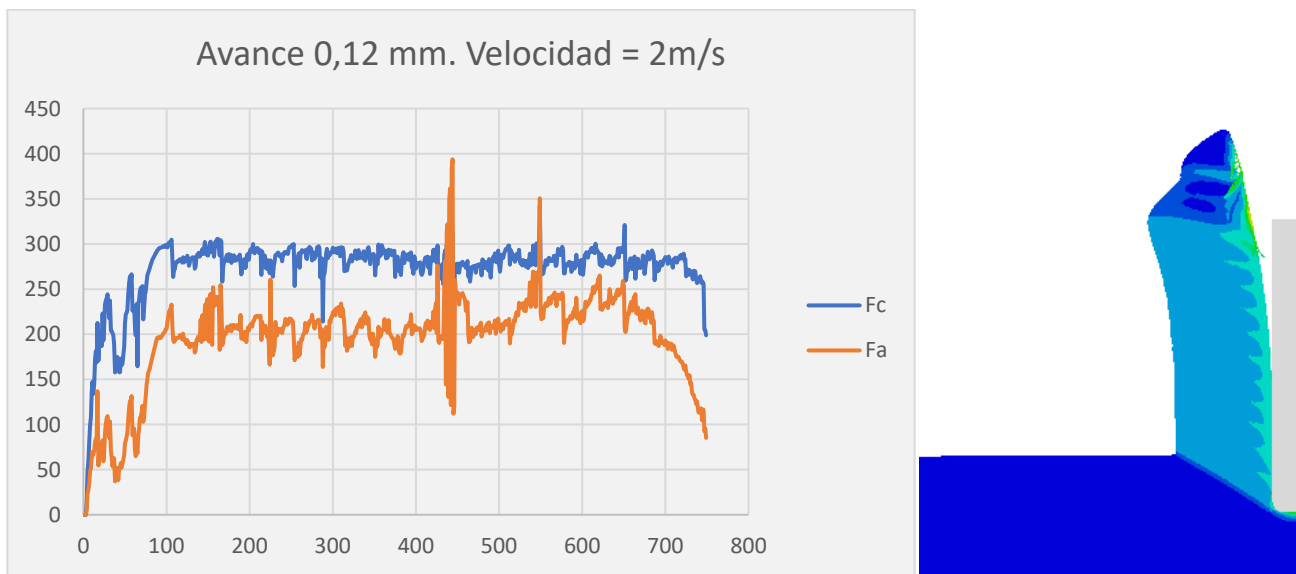


Figura 18. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 2 m/s

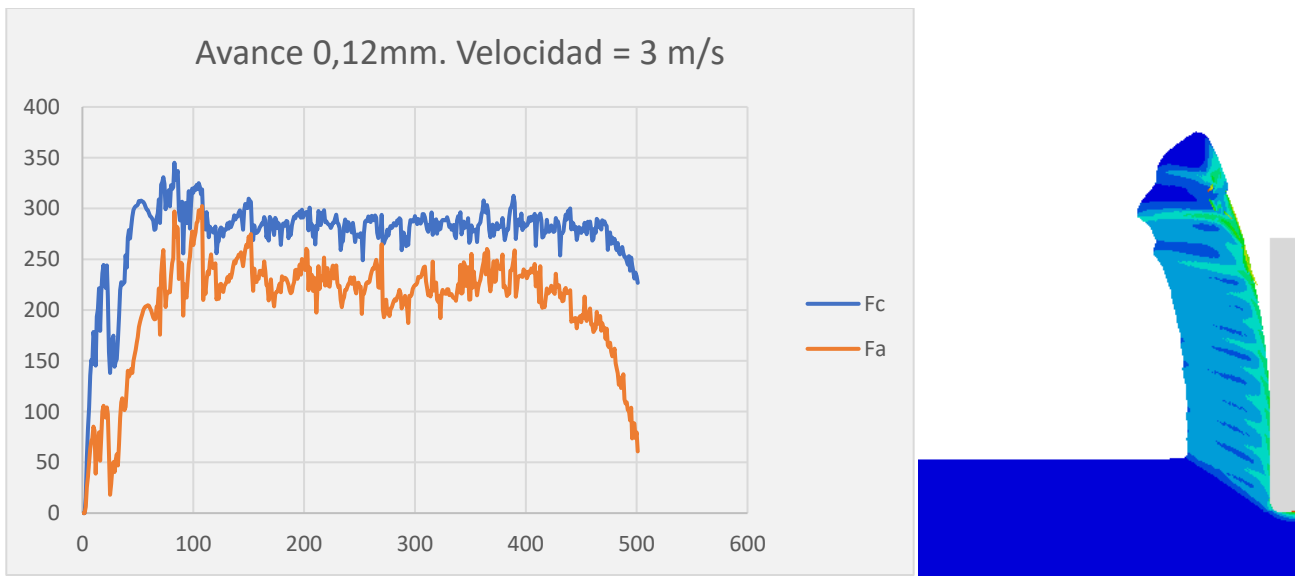


Figura 19. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 3 m/s

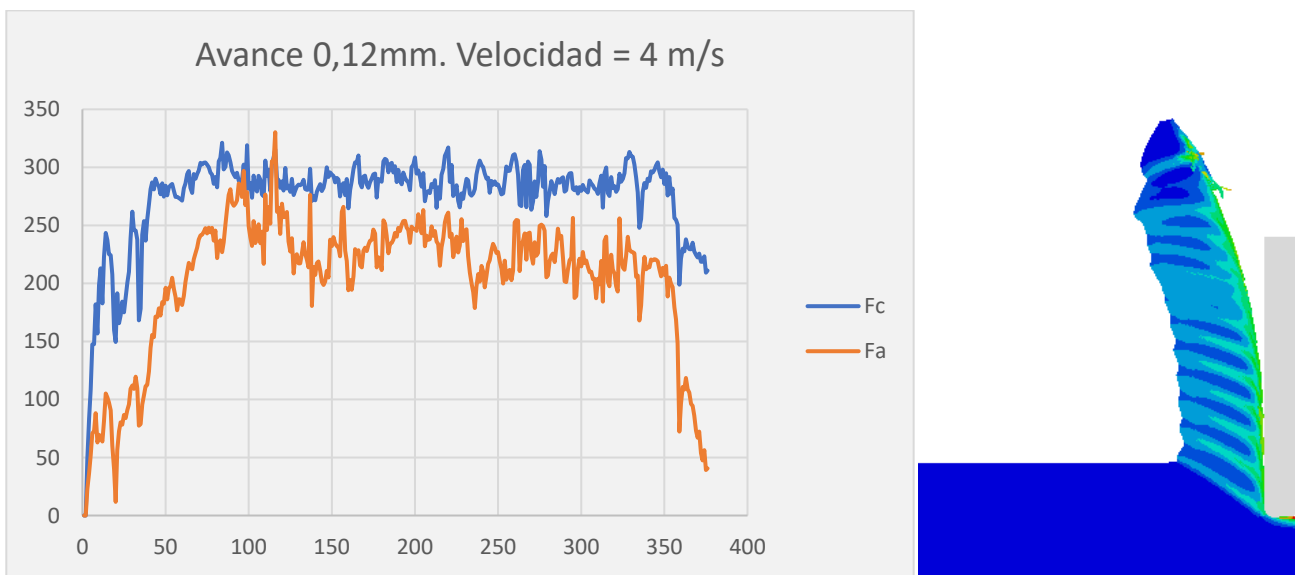


Figura 20. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 4 m/s

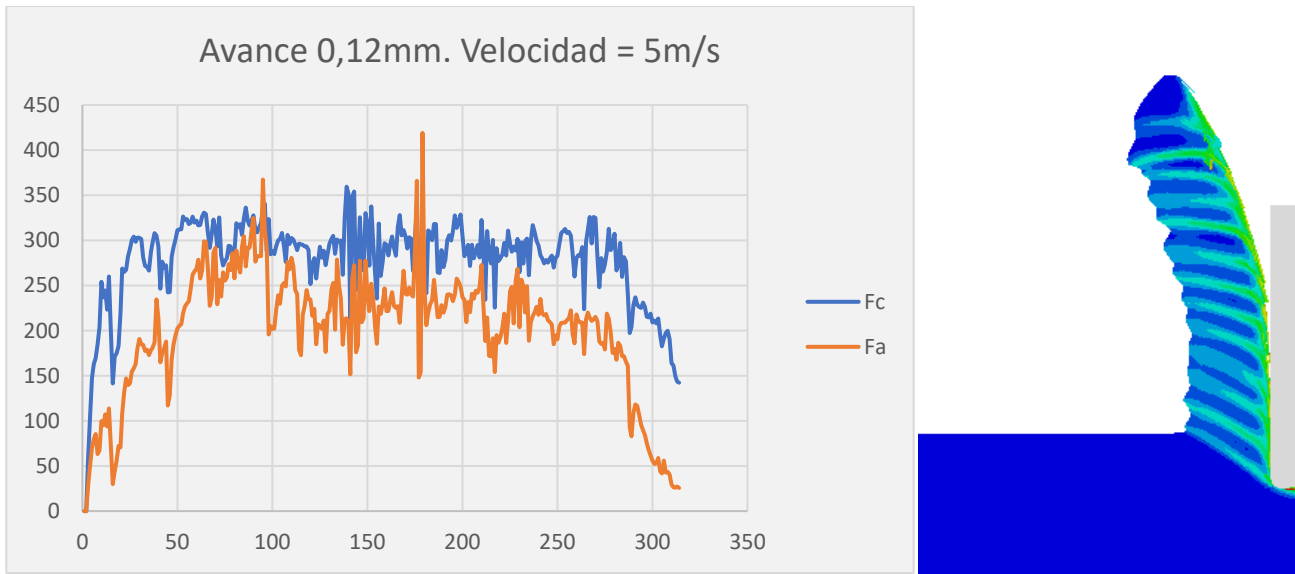


Figura 21. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 5 m/s

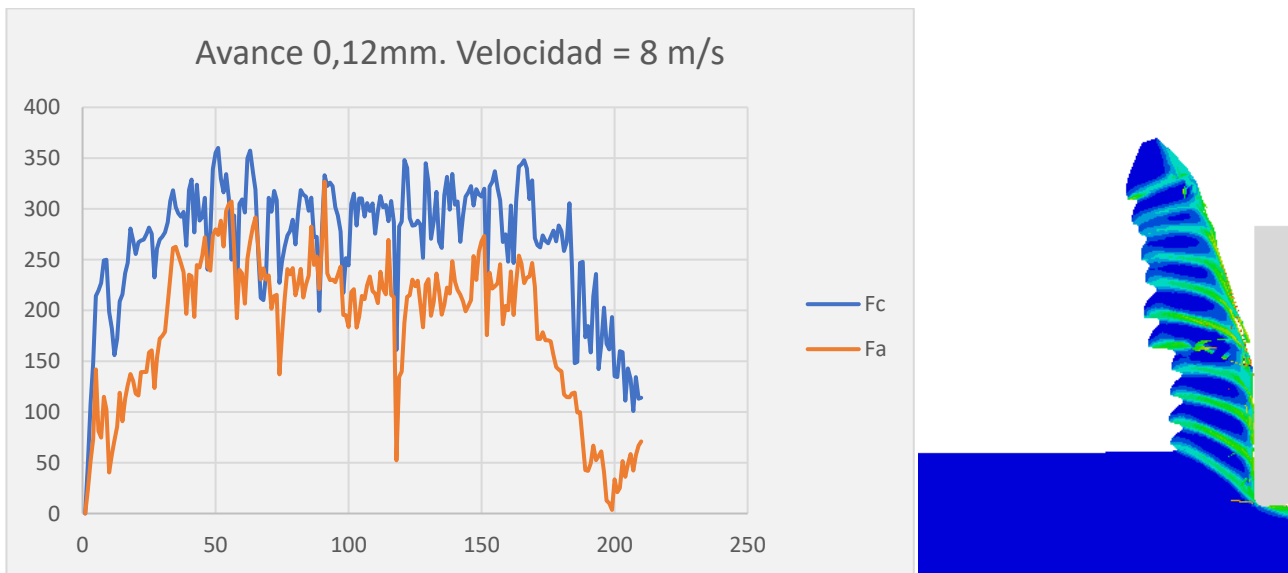


Figura 22. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 8 m/s

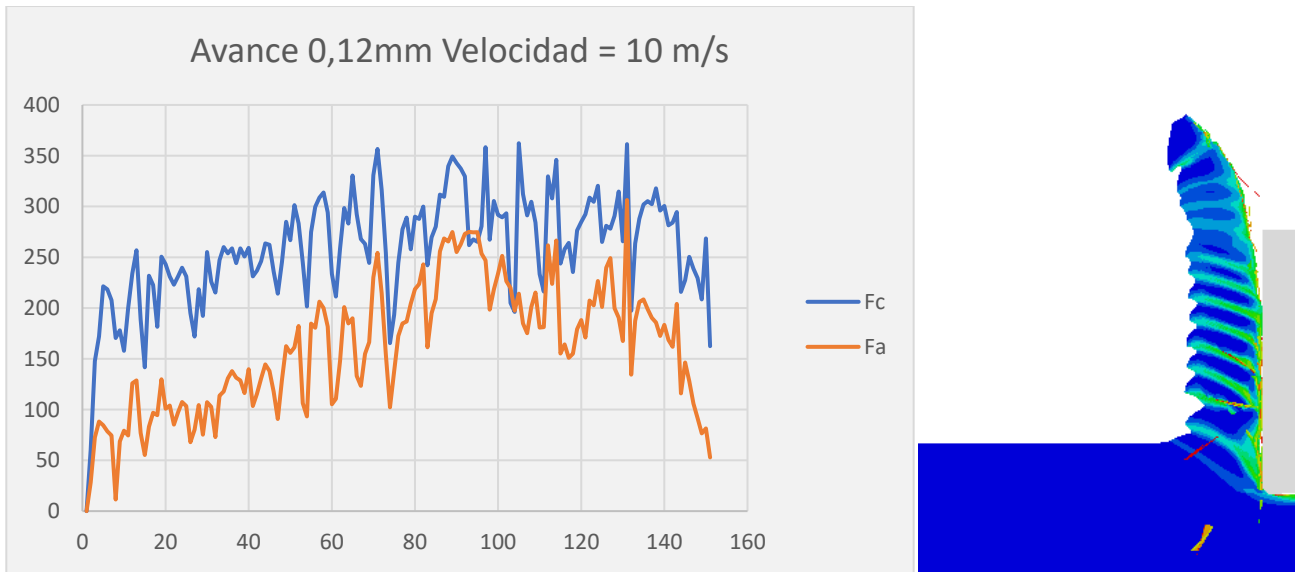


Figura 23. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 10 m/s

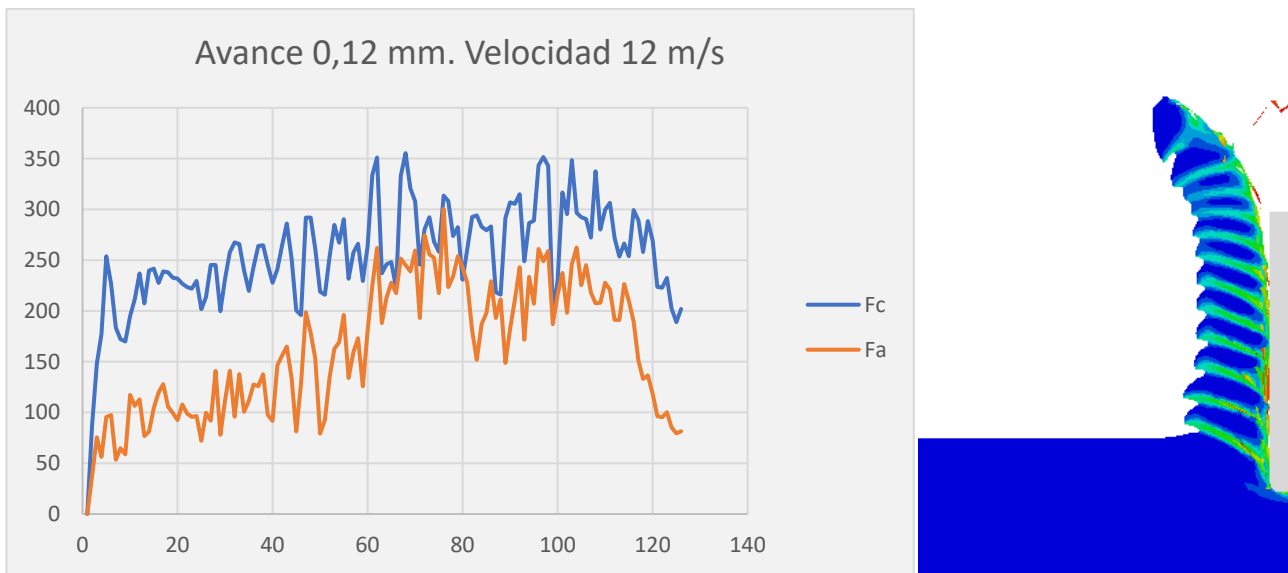


Figura 24., Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 12 m/s

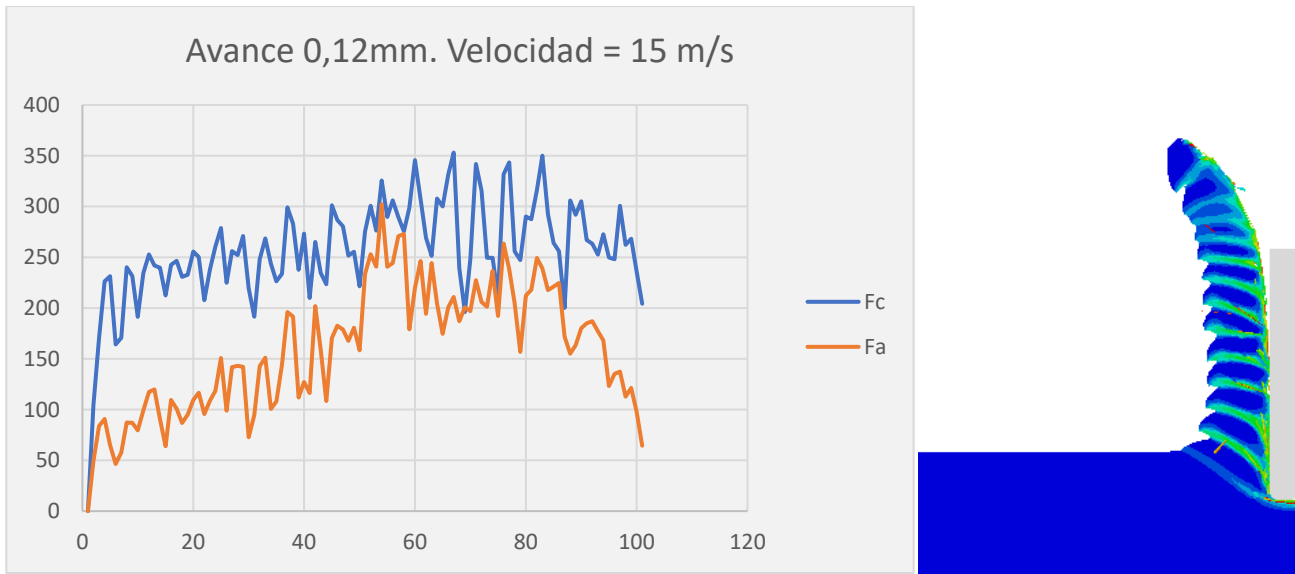


Figura 25. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 15 m/s

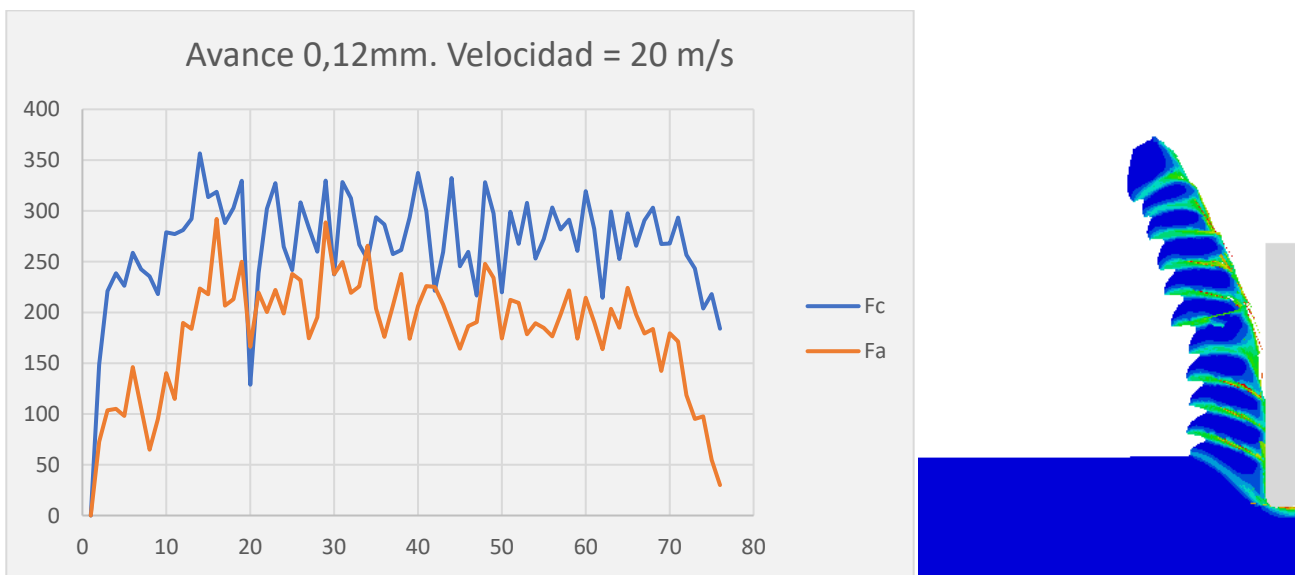


Figura 26. Fuerza y geometría Avance = 0,12mm. Velocidad = 20 m/s

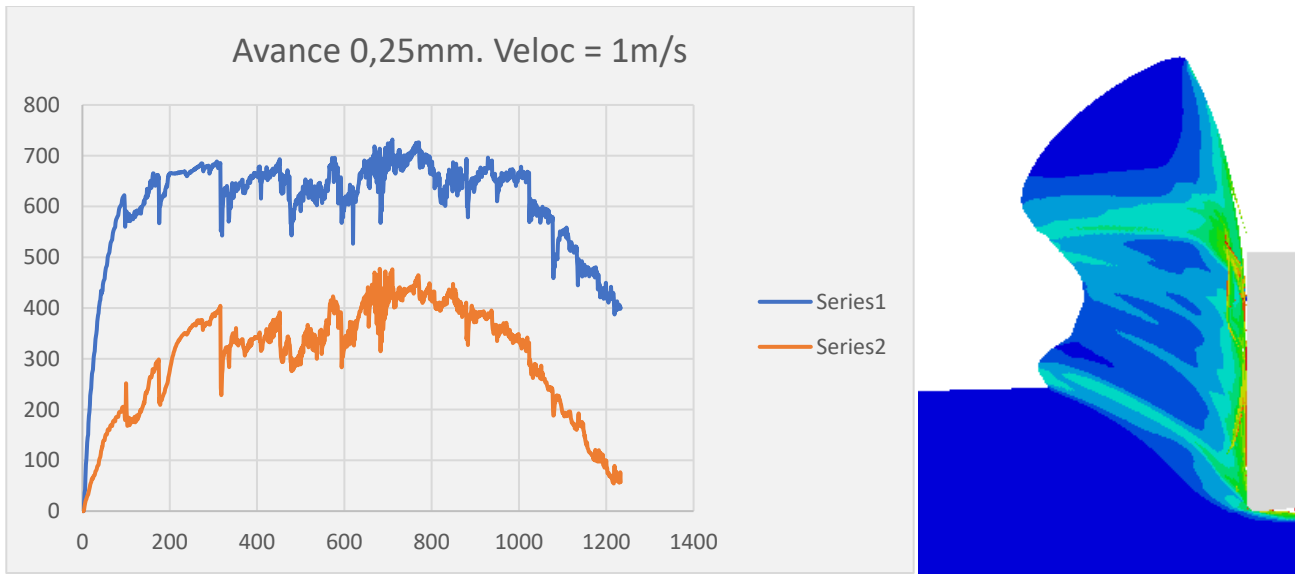


Figura 27. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 1 m/s

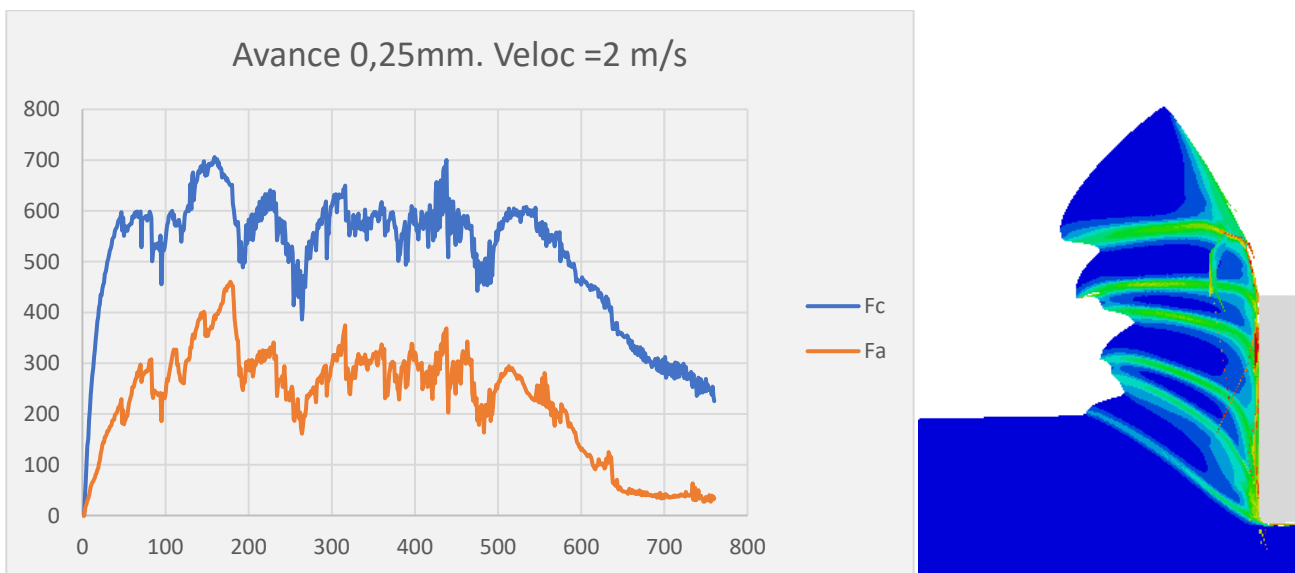


Figura 28. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 2 m/s

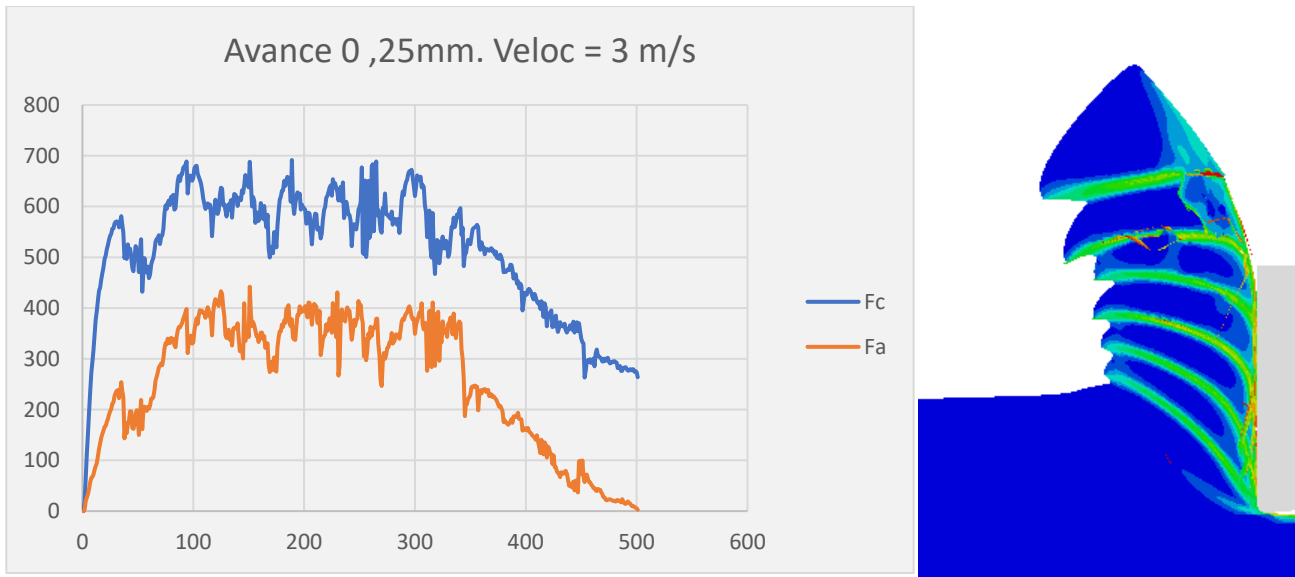


Figura 29. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 3 m/s

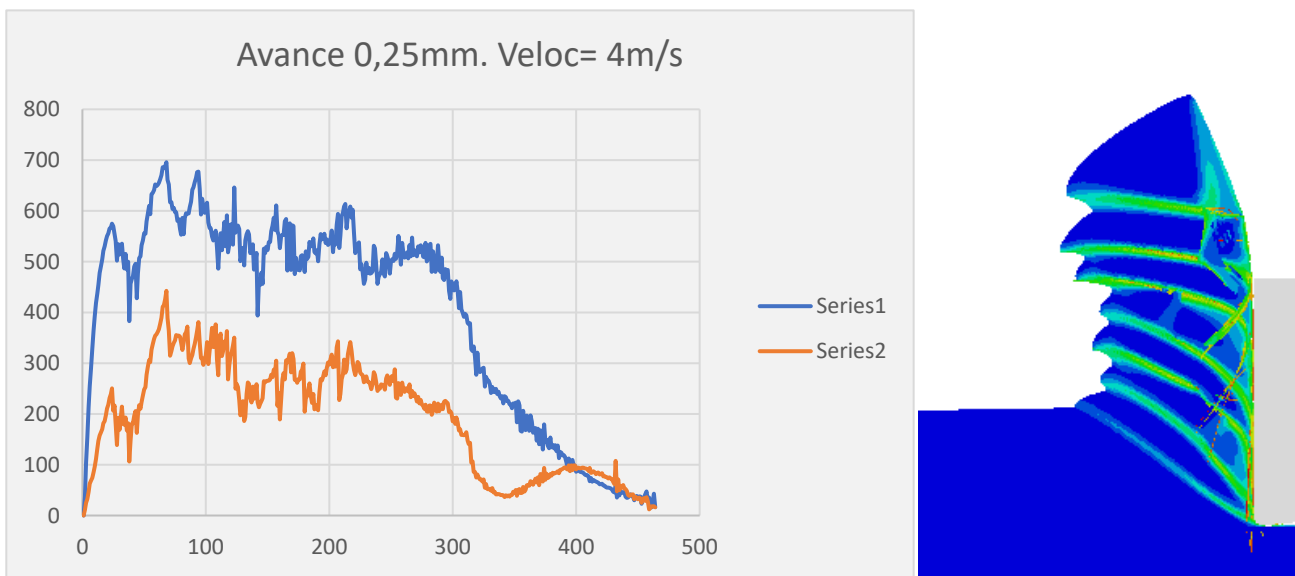


Figura 30. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 4 m/s

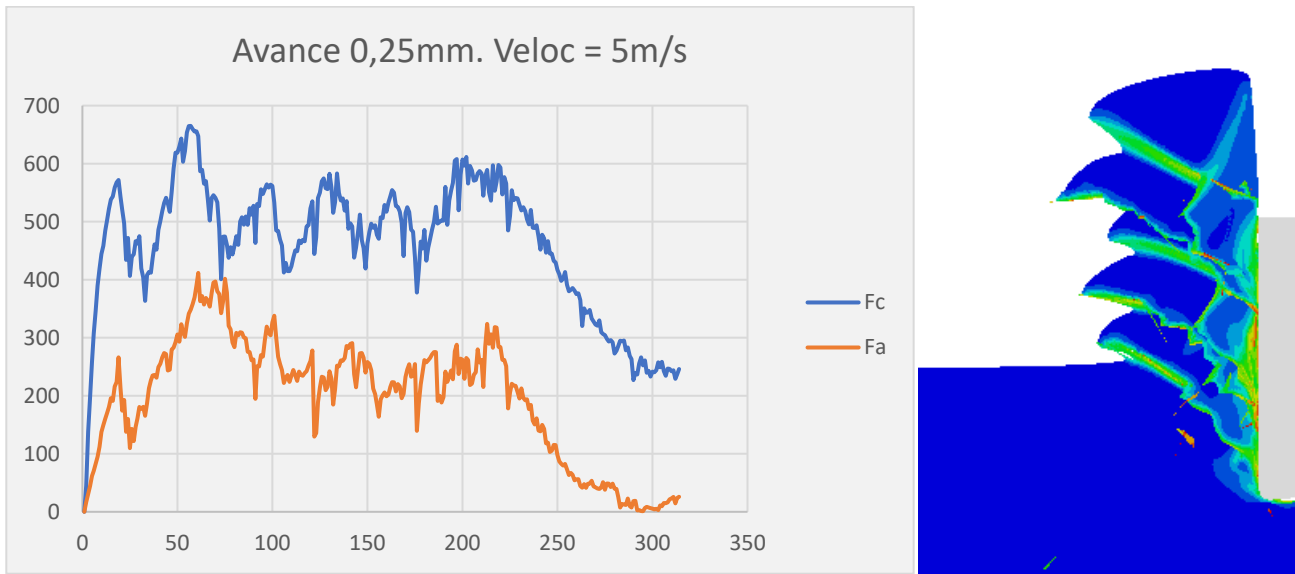


Figura 31. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 5 m/s

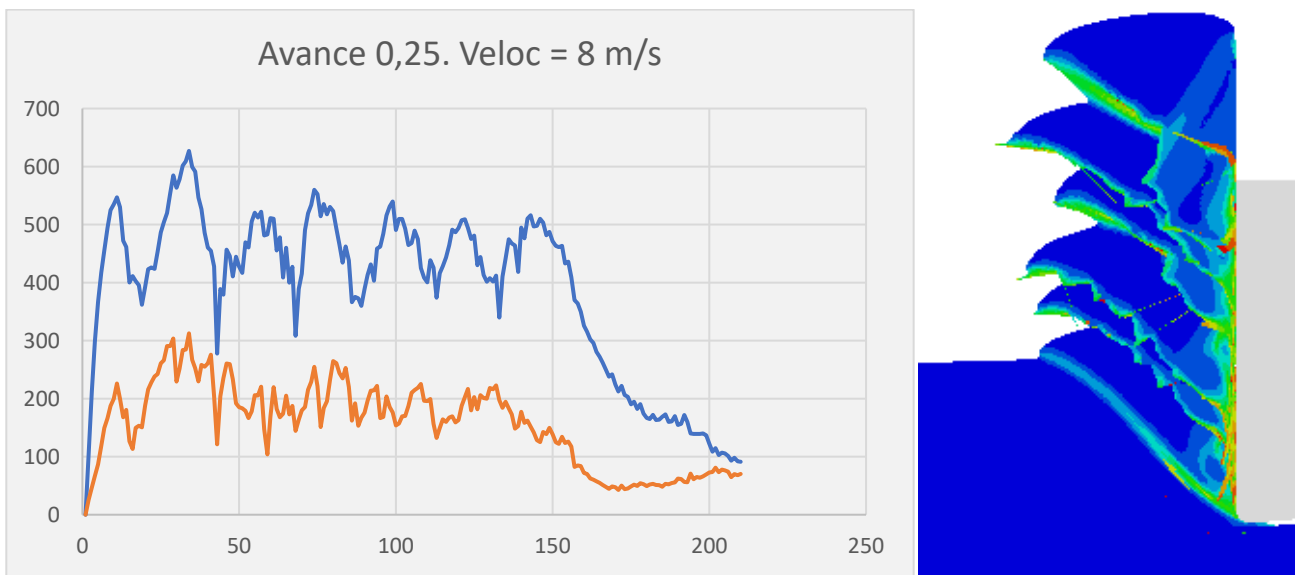


Figura 32. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 8 m/s

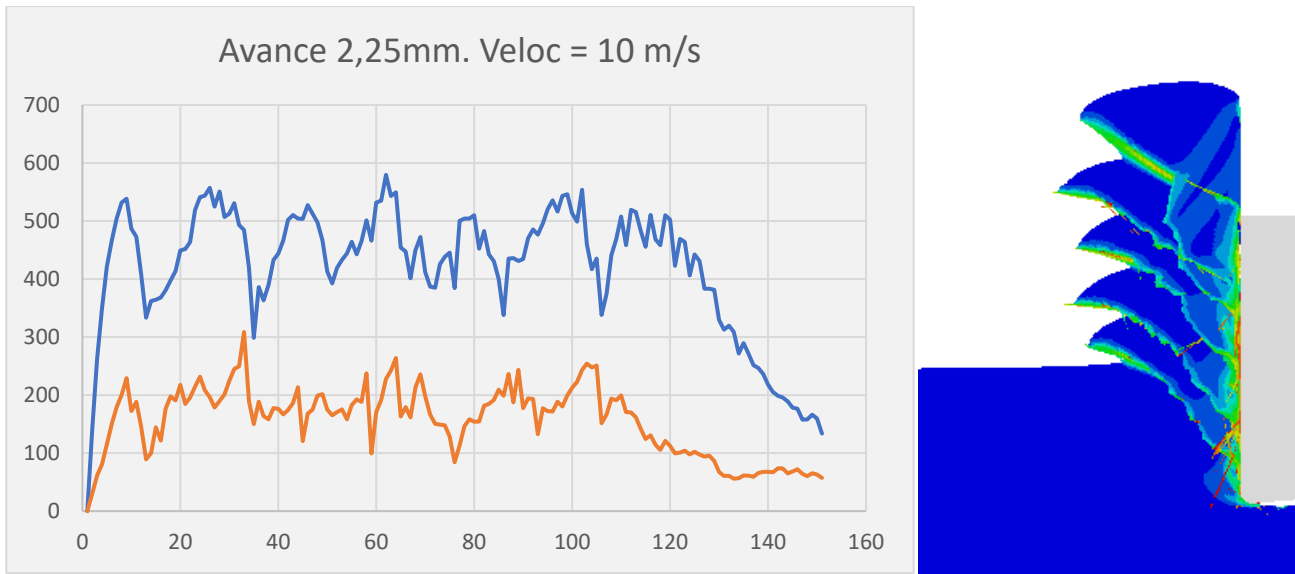


Figura 33. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 10 m/s

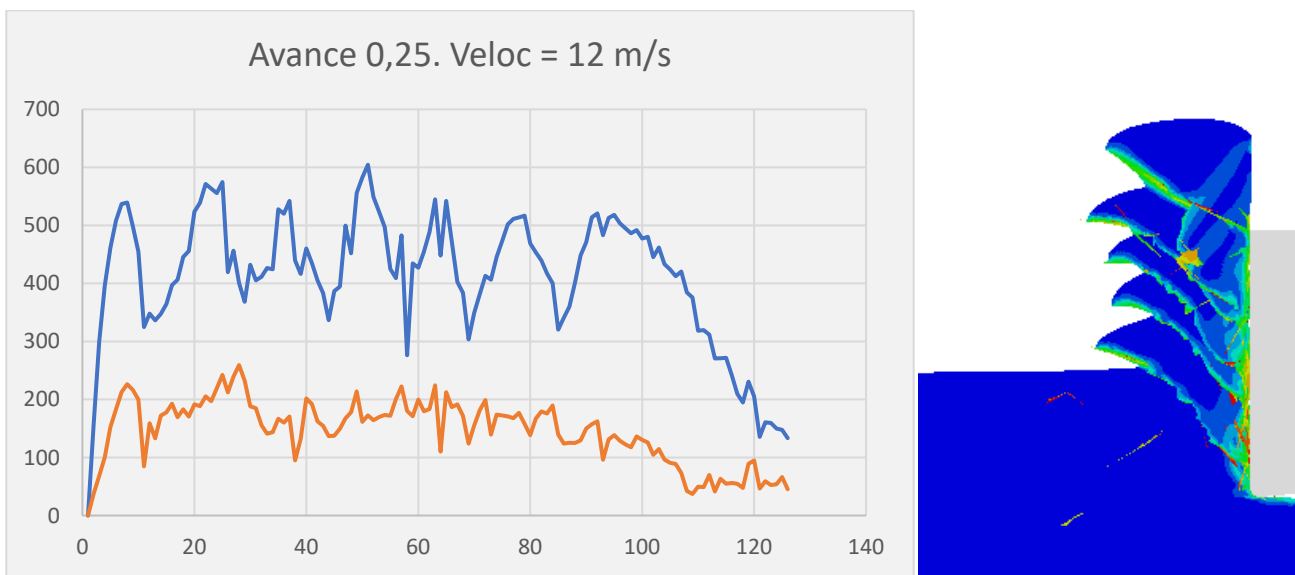


Figura 34. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 12 m/s

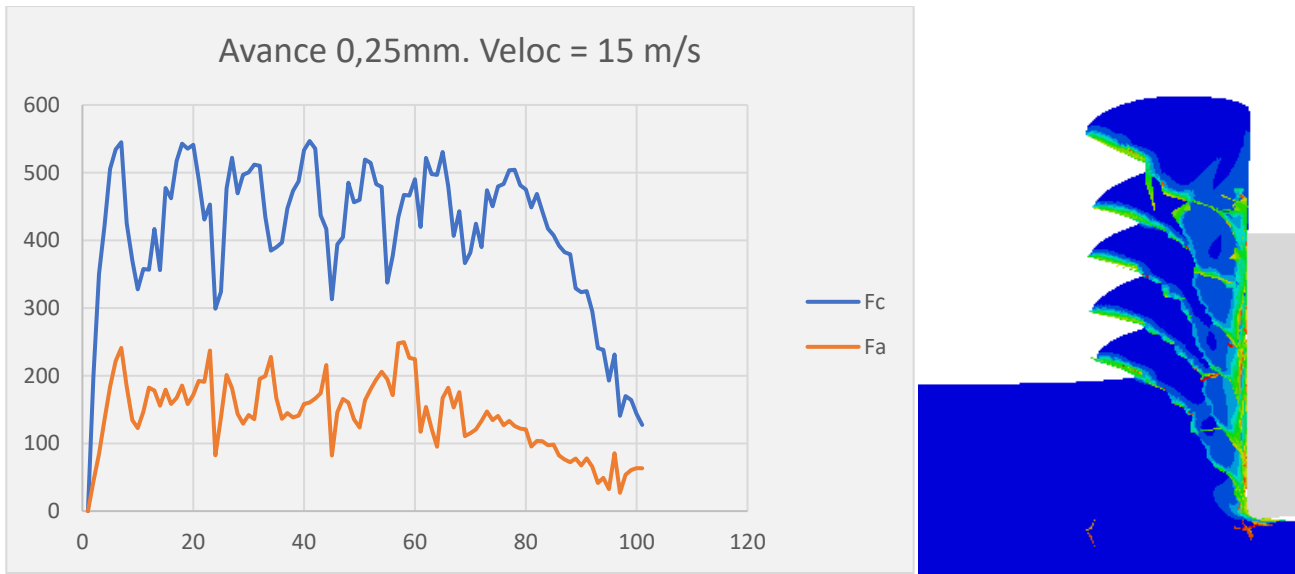


Figura 35. Fuerza y geometría Avance = 0,25mm. Velocidad = 15 m/s

7 Bibliografía

- Mecánica de corte. *Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del País vasco.*
- Ti6Al4V Titanium Alloy. *Arcam EBM system*
- El Método de los Elementos Finitos. Universidad de Sevilla. *J. De La Cruz*
- Investigation on Chip Formation during Machining Using Finite Element Modeling. *Moaz H. Ali, Basim A. Khidhir, Bashir Mohamed, A.A. Oshkour (2012)*
- Some clarifications on the mechanics of chip formation when machining titanium alloys. *R. Komanduri (1981)*
- Analysis of adiabatic shear banding in orthogonal cutting of Ti Alloy. *M.H. Miguélez, X. Soldani, A. Molinari (2013)*
- Adiabatic shear banding and scaling laws in chip formation with application to cutting of Ti-6Al-4V. *A. Molinari, X. Soldani, M.H. Miguélez (2013)*
- Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti-6Al-4V: experiments and modeling. *A. Molinari, C. Musquar and G. Sutter (2000)*
- Tecnología de fabricación. *Departamento de Ingeniería Mecánica. UC3M*
- Fundamentos de la manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. *Groover, M (2007)*
- Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys, *J Mater Process Technol. Hua J, Shivpuri R (2004),*
- Investigation on Morphological Evolution of Chips for Ti-6Al-4V Alloy with the Increasing Milling Speed. *Hongguang Liu, Jun Zhang, Yifei Jiang, Yong He, Xiang Zu, Wanhua Zhao. (2016)*

- Determining the Normalized Cockcroft-Latham Criterion for Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Tensile Testing At Room Temperature. *Andrzej Gontarz, Jacek Piesiak (2015)*
- *A. Gente, H.W. Hoffmeister*, Chip formation in machining Ti-6Al-4V at extremely high cutting speeds, *CIRP 50 (1) (2001)*.
- *J. Hua, R. Shivpuri*, Prediction of chip morphology and segmentation during the machining of titanium alloys, *Journal of Materials Processing Technology 150 (2004)*