



Optimización del diseño de herramientas y validación mediante FEM para la mejora de su vida útil

Moisés Batista¹, Jorge Salguero², Juan Manuel Vázquez³, Irene del Sol⁴, Álvaro Gómez⁵

Escuela Superior de Ingeniería. Universidad de Cádiz. Avda de la Universidad de Cádiz 10, 11519 Puerto Real (Cádiz)

¹moises.batista@uca.es, ²jorge.salguero@uca.es, ³juanmanuel.vazquez@uca.es, ⁴irenedelsol@uca.es, ⁵alvaro.gomez@uca.es

En los procesos sustractivos existen muchos factores que pueden provocar un descenso de su rendimiento, como puede ser la generación de residuos, los utillajes, la complejidad de la programación o la vida de las herramientas. Se está trabajando intensamente en la mejora de estos factores, minimizando el impacto medioambiental de los procesos para mejorar la gestión de los residuos, desarrollando sistemas de anclaje rápido e inteligente que permite la minimización de vibraciones en máquina o desarrollando sistemas inteligentes que mejoran la eficiencia de los sistemas CNC, entre otros. Por otro lado, el caso de las herramientas de corte es más complejo debido a la amplitud de soluciones comerciales existentes. En la actualidad se tiende a utilizar materiales de herramienta o recubrimientos avanzados, como el diamante policristalino o el nitruro de boro cúbico, o a modificar superficialmente la herramienta para mejorar su rendimiento. Sin embargo, ambas soluciones son costosas y complejas, poniendo en muchos casos en peligro el rendimiento económico de la operación de mecanizado.

Por otro lado, existen técnicas que han probado su eficacia para la mejora del rendimiento de las herramientas de corte, como las técnicas de simulación numérica basadas en el Método de los Elementos Finitos. Esta técnica de simulación está ampliamente extendida y ha sido validada en distintas ocasiones, demostrando que ofrece resultados muy aproximados con los que testar condiciones de corte. Esta solución permite analizar la influencia de las distintas configuraciones de herramienta sin abordar costosos procesos de experimentación física, permitiendo optimizar el proceso de mecanizado. Por ello, en este artículo se presenta un estudio en el que se han utilizado técnicas FEM (Finite Element Method) para el re-diseño de herramientas de corte. En este caso, se parte de una herramienta utilizada industrialmente que presenta un comportamiento anómalo que hace disminuir el rendimiento del proceso de mecanizado. Esta herramienta presenta fractura por vibraciones en pieza y tanto el utillaje utilizado, la programación, ni los sistemas de lubricación se pueden modificar debido a la configuración del proceso. Es decir, la única vía de mejora del proceso es la que pueda proporcionar la mejora de la propia herramienta de corte.

Para ello, se ha utilizado un software FEM de mecanizado comercial para analizar el comportamiento de la herramienta, modificando los aspectos geométricos más influyentes en el proceso, como son el ángulo de desprendimiento y el ángulo de incidencia de la herramienta. Estos ángulos han sido seleccionados a partir de una simulación global 3D del proceso. Sin embargo, para minimizar el coste computacional se han realizado simulaciones 2D. La solución desarrollada se ha implementado en una nueva herramienta de corte, la cual se ha validado en procesos de mecanizado de contornos de una pieza aeronáutica real fabricada en la aleación de titanio Ti6Al4V.

1. Introducción

La aleación de titanio Grado 5 (ASTM), UNS R56400 ó Ti6Al4V, es la aleación de titanio de uso más común en la industria actual en aplicaciones biomédicas, aeroespaciales y automotrices debido a su excelente relación resistencia-peso y su biocompatibilidad. La composición de esta aleación puede variar ligeramente según la normativa o el fabricante escogido. No obstante, su principal característica es poseer entre 5,5 a 6,5 % de Al y un 3,5 a 4,5 % de Ti [1,2]. Además de esto, posee otros componentes menos importantes como Fe, C, O ó N.

Cuanto mayor es el contenido en oxígeno, nitrógeno, aluminio o vanadio, mayor es la resistencia de la aleación, y por el contrario, cuanto menor es el porcentaje de estos aleantes, mayor es la tenacidad a la fractura, la ductilidad, la resistencia a la corrosión inducida por tensión, y la velocidad de propagación de grieta [1,3].

Las aleaciones de titanio grado 5 se usan frecuentemente con una estructura mill-annealed, la cual presenta una buena combinación de resistencia, tenacidad, ductilidad y resistencia a la fatiga. Además, el Ti6Al4V, como aleación α/β puede presentar cierta variedad de composiciones de fases α y β , que dependen del tratamiento térmico y del contenido en elementos intersticiales. En función del tratamiento termomecánico empleado, la microestructura puede clasificarse en varias categorías, mostrándose como principales la equiaxial, la martensítica, la laminar y la bimodal (unión de equiaxial y laminar).

Las estructuras equiaxiales se producen tras trabajar mecánicamente el material en el rango de temperaturas $\alpha + \beta$, y proceder posteriormente a un recocido a temperaturas inferiores a la temperatura de inicio de martensita. Todo ello produce una microestructura formada por granos finos de α y β denominada mill-annealed [4].

La aleación de titanio Ti6Al4V presenta una serie de propiedades mecánicas que le confieren un comportamiento excelente en determinados ámbitos de aplicación como la industria aeronáutica y aeroespacial, aplicaciones biomédicas, industria de automoción, etc.

Como ya se ha mencionado, el mecanizado de la aleación Ti6Al4V plantea importantes desafíos debido a sus propiedades únicas de este material. Su baja conductividad térmica y su alta resistencia mecánica y reactividad química se traducen en el desgaste prematuro de la herramienta que pueden comprometer las piezas mecanizadas.

Su baja conductividad térmica provoca acumulación de calor en la interfaz herramienta-material, lo que acelera el desgaste apareciendo mecanismos abrasivos y adhesivos. En el caso del mecanizado de titanio, la alta dureza de la aleación provoca un desgaste abrasivo sobre la herramienta que arranca partículas de la herramienta provocando un desgaste exponencial. Además, el calor acumulado en el filo de la herramienta puede inducir microgrietas, promoviendo fallos catastróficos [5].

Por otro lado, el alto calor generado genera la aparición de óxidos de titanio en distintos estados de oxidación que favorece la adhesión de material mecanizado [6]. Estudios como el de Vasylyev et al. [7] confirman que la formación de capas de óxido en la superficie del material puede aumentar su dureza lo que podría acelerar el desgaste de la herramienta. Estos dos efectos actúan de forma sinérgica dañando la herramienta desde los primeros instantes de mecanizado [6]. Este mecanismo se conoce como adhesión secundaria, entendiéndose la primera como aquella donde el material de la herramienta se adhiere a la viruta durante su fluencia.

Los parámetros de corte afectan a este proceso sin embargo, el uso de sistemas de lubricación avanzados como los de mínima cantidad (MQL) reduce las temperaturas generadas durante el mecanizado, prolongando la vida útil de las herramientas [8]. Aunque a esta solución se le une el uso de recubrimientos que han demostrado ser efectivos para mejorar la resistencia al desgaste [9].

En el caso especial del fresado periférico de piezas complejas, el problema se incrementa ya que se debe tener un control muy específico de las trayectorias de mecanizado así como de los parámetros del proceso y del utillaje de amarre de las piezas. Este problema es aún mayor si este fresado se realiza en contornos en 5 ejes ya que se requieren útiles específicos y amarres muy fiables. Sin embargo, existen grandes dificultades para conseguir un amarre adecuado en condiciones industriales. Por ello, además, se tienen que vencer una serie de vibraciones que pueden provocar fracturas en la herramienta. Así mismo, estas piezas de geometrías complejas se obtienen por procesos de deformación plástica que provoca que el espesor de las piezas no sea uniforme. Por ello, debido a las trayectorias de mecanizado la herramienta debe soportar unos cambios bruscos de trayectoria, en ángulos agudos en XZ e YZ, que se traduce en un incremento crítico de la profundidad de corte en sentido axial. Ante esta problemática, se ha visto que la simulación numérica es una alternativa que permite optimizar las condiciones de corte [10].

En este contexto industrial, donde el amarre de las piezas no puede asegurar que se eliminen las vibraciones que puedan aparecer y que las trayectorias como las geometrías son invariables y no homogéneas, se presenta un estudio que intenta minimizar estos problemas desde un diseño específico de la herramienta basado en el conocimiento generado a través de simulaciones utilizando el método de los elementos finitos (FEM).

2. Metodología experimental

En este artículo se presenta el proceso de diseño de una herramienta de corte para el mecanizado una chapa de Ti6Al4V proveniente de un proceso de conformado plástico que será recantada en 5 ejes, sometido a vibraciones.

Cómo ya se ha comentado, el material objeto de estudio la aleación Ti6Al4V cuya composición viene determinada en la Tabla 1. Además, por sus propiedades especiales recogidas en las Tablas 2 y 3, la convierte en una aleación de baja maquinabilidad [1,2].

Tabla 1: Composición de la aleación Ti6Al4V (wt%)

	Al	V	Fe	C	O	N	H	Ti
UNE-38723	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	0,08	0,13	0,05	0,012	Resto
ISO 5832-3	5,5-6,75	3,5-4,5	0,30	0,08	0,20	0,05	0,015	Resto
ASTM F136	5,5-6,5	3,5-4,5	0,25	0,08	0,13	0,05	0,012	Resto

Tabla 2: Propiedades físicas de la aleación Ti6Al4V [1,2]

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura Beta-transus Nominal	996	°C
Densidad	4,43	g/cm ³
Punto de Fusión	1650	°C
Resistividad Eléctrica	171	10 ⁻⁶ ohm·cm
Módulo de Elasticidad - Tensión	114	GPa
Módulo de Elasticidad – Torsión	42	GPa
Calor Específico	565	J/Kg·°C
Conductividad Térmica	6,6	W/m·°C

Tabla 3: Propiedades mecánicas de la aleación Ti6Al4V [1,2]

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD/ COMENTARIO
Brinell	334	Estimada a partir de Rockwell C
Dureza Rockwell C	36	-
Vickers	349	Estimada a partir de Rockwell C
Resistencia a la tracción, última	950	MPa
Elongación a la rotura	14%	-
Reducción de área	36%	-
Módulo de elasticidad	113,8	GPa
Límite elástico de compresión	970	MPa
Coefficiente de Poisson	0,342	-

El objetivo del estudio será el diagnóstico inicial de una herramienta comercial utilizada en el fresado periférico de titanio.

La selección de herramienta viene condicionada por su uso y la necesidad de aumentar la resistencia de la herramienta frente a esfuerzos tangenciales. Durante el proceso la herramienta se ve sometida a esfuerzos de flexión repetitivos por ello se recurre a Acero Rápido pulvimetalúrgico (HSS-PM) cuyo comportamiento es mejor que el de herramientas de WC-Co lo que mejora el comportamiento de la herramienta frente a las vibraciones.

Dado que se mecanizará la aleación Ti6Al4V, se seleccionará un recubrimiento específico para altas temperaturas, concretamente, TiAlN que presenta una extrema resistencia a las tensiones y una alta resistencia al desgaste en caliente lo que lo hace idóneo al fin buscado. Además, se utilizará una herramienta de 4 dientes, muy recomendado para esta problemática y 8 mm de diámetro condicionada por las especificaciones del propio proceso.

La herramienta corresponde a una herramienta comercial de la marca KENDU cuyos datos vienen recogidos en la Figura 1 y para la que se utilizarán los parámetros recomendados por el fabricante ($S=1400$ rpm; $f_z=0,05$ mm).

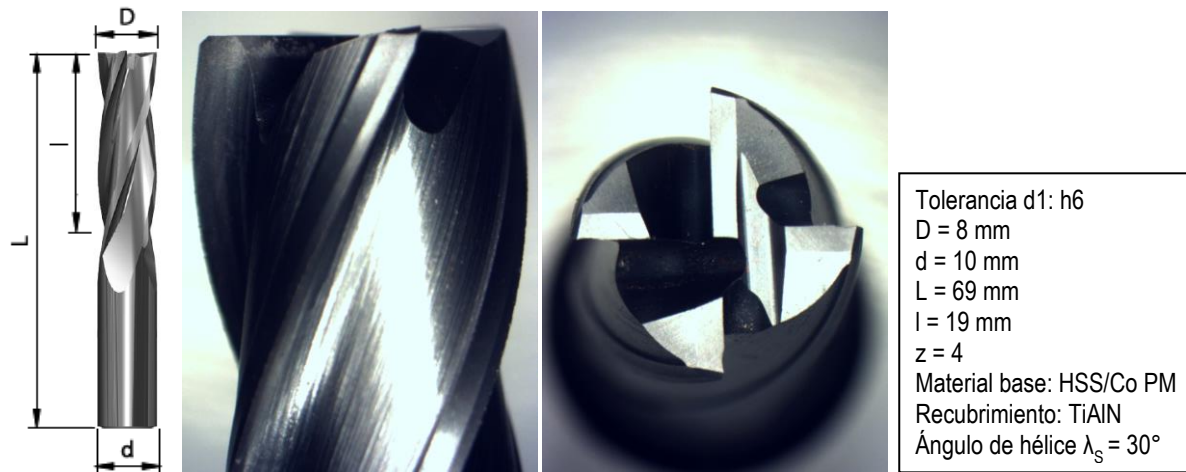


Figura 1: Datos de la herramienta de alto rendimiento de la marca KENDU

Con objeto de analizar el rendimiento de las herramientas, ambas se utilizarán cinco veces, en condiciones industriales hasta el final de su vida, analizando su desgaste utilizando Microscopía Óptica Estereoscópica (SOM) y Microscopía Electrónica de Barrido junto con Espectroscopía de Energía Dispersiva (SEM-EDS).

Posteriormente, se realizarán simulaciones 3D en ambos casos con objeto de analizar las causas del desgaste, analizándose los esfuerzos y temperaturas generadas. Estas simulaciones se realizarán con el software Advantedge de Thirdwave cuyo modelo reológico para el mecanizado de Ti6Al4V, se encuentra testado y validado.

Una vez obtenidos los parámetros geométricos más relevantes, se procederá a realizar un análisis de estos parámetros utilizando simulaciones 2D.

Con los datos obtenidos, se validará la herramienta realizando ensayos en planta.

3. Resultados

3.1. Diagnostico inicial

El mecanizado de Titanio está condicionado por las propiedades del material que lo convierte en un material de baja maquinabilidad. Su alta resistencia mecánica genera problemas mecánicos sobre la herramienta que pueden desencadenar abrasiones e incluso fracturas mecánicas. Esto se une a su alta reactividad química a temperaturas relativamente bajas que se traducen en la aparición de óxidos de titanio sobre la herramienta, en algún caso de forma muy exotérmica. Este comportamiento se ve agravado por su baja conductividad térmica que provoca que el calor se acumule en la zona de corte, aumentando el daño sobre la herramienta. Además, este desgaste prematuro de la herramienta que pueden comprometer las piezas mecanizadas. De esta forma aparecen mecanismos asociados a causas mecánicas, como la abrasión y otros asociados a adhesión. Estos mecanismos adhesivos tradicionalmente se asocian a la aparición de óxidos sobre la herramienta [6-11], sin embargo, en determinadas condiciones severas, los efectos mecánicos son tan dañinos que la adhesión puede aparecer por causas mecánicas y no térmicas. De esta forma el mecanismo de adhesión se podría parecer a lo ocurrido en el mecanizado de acero y por ello, no es descartable una adhesión directa donde el material de la herramienta sea arrancado por adherirse a la viruta en lugar de la tradicional adhesión indirecta donde el material de la viruta queda adherida a la herramienta.

En la Figura 2.a se puede apreciar una herramienta de fresado tras el fresado periférico de una pieza. Se puede apreciar como aparecen daños a lo largo de todo el filo de corte además de adhesión secundaria. Se puede apreciar como material de la viruta ha quedado adherido al filo de la herramienta, provocando un daño generalizado por chipping. Además, se aprecia una cierta iridiscencia propia de la aparición de óxidos de titanio, lo que manifiesta un daño térmico. Este daño provoca que la viruta quede deformada y que su fluencia no haya sido estable por ello se aprecia una viruta arrugada (Figura 2.b).

Al continuar utilizando la herramienta hasta el final de su vida, la herramienta sigue perdiendo material y aparece una pérdida total de su geometría (Figura 3). Al final de su vida se aprecia como grandes cantidades de material quedan adheridos a la herramienta pero no se aprecia iridiscencia por lo que los daños mecánicos han progresado de forma muy notable.

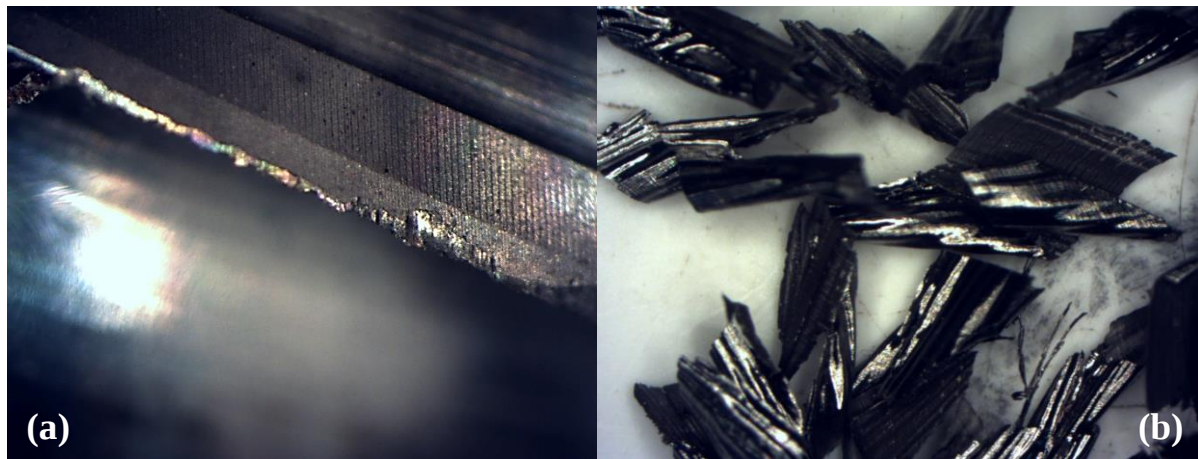


Figura 2: Análisis SOM. (a) Daño sobre el filo de la herramienta. (b) Viruta deformada y arrugada



Figura 3: Herramienta al final de su ciclo de vida

Sin embargo, no se debe llegar a este estado, sino que la herramienta debe ser reemplazada antes, cuando los daños no puedan provocar que las piezas manifiesten defectos. En ese punto de vida, tras 40 minutos mecanizados, al analizar las herramientas mediante SEM, aparece un desgaste uniforme con la aparición de chipping generalizado y con una adhesión generalizada de material sobre el filo. Incluso se pueden apreciar microvirutas adherida a la herramienta (Figura 4.a).

Por otro lado, la aparición sinérgica característica de Adhesión Secundaria y Abrasión es apreciable y generalizada pero con una distribución uniforme. Este daño avanza hasta el filo secundario donde se puede apreciar una alta abrasión (Figura 4.b).

Además, pueden aparecer fallos catastróficos en la herramienta en un momento determinado de su vida, apareciendo fracturas localizadas. Al analizar la zona de la fractura (Figura 5.a) se aprecia una morfología coherente con una fractura producida por ciclos de fatiga con la aparición de las características “beachmarks”. Esto verifica la hipótesis planteada con anterioridad sobre el comportamiento cíclico de las fuerzas lo que hace que la herramienta deba soportar ciclos de tracción-compresión en tiempos relativamente cortos. Además, aparecen zonas con una alta abrasión y zonas con un daño elevado que puede desencadenar en esa fractura (Figura 5.b).

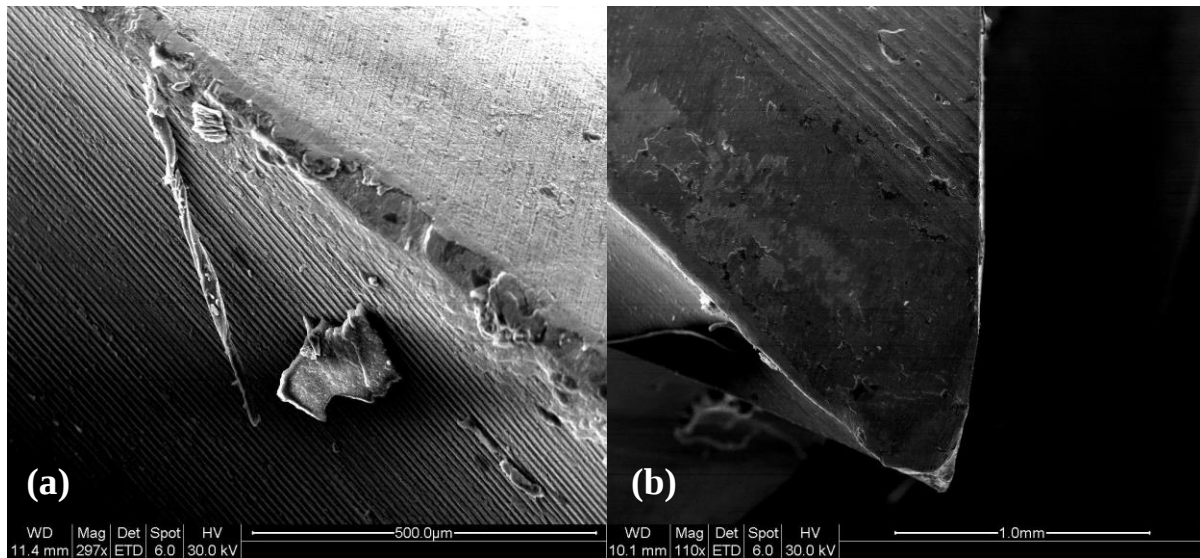


Figura 4: Análisis SEM. (a) Daño sobre el filo de la herramienta. (b) Daño en la punta de la herramienta

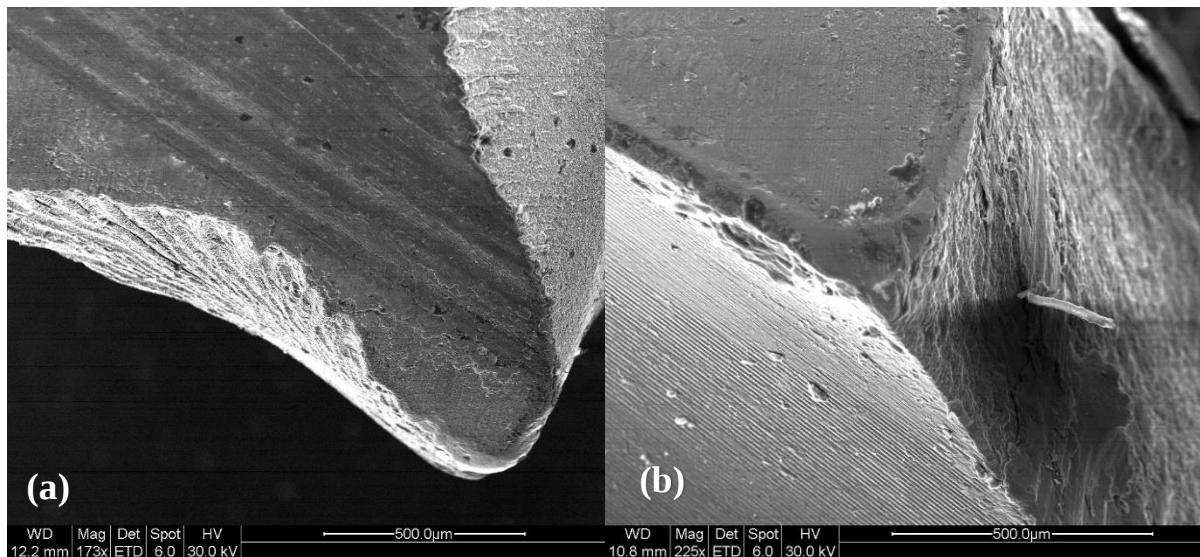


Figura 5: Fractura analizada mediante SEM. (a) Fractura por fatiga de la herramienta. (b) Abrasión en la punta de la herramienta

Del análisis FEM de esta segunda herramienta se observó su mejor comportamiento. En primer término, se ha visto que la temperatura máxima es sensiblemente inferior descendiendo hasta aproximadamente los 730 °C (Máximos absolutos de 990,4949°C en Zona 8; 857,3959°C en Zona 51; 1259,958°C en Zona 56). Las temperaturas medias también descenden hasta los 550 °C aproximadamente (Figura 6). Estos valores corresponden a máximos encontrados en nodos y no en zonas grandes por ello en la figura no se aprecia la tonalidad roja.

Por su parte, la distribución de tensiones es más uniforme, esto se traslada en descenso considerable de las tensiones máximas cuyos máximos no superan los 3350 MPa (Figura 7). La comparativa del comportamiento triaxial de las fuerzas de corte y de las temperaturas se puede observar en la Figura 14. Como puede verse, el valor absoluto de las fuerzas de corte es sensiblemente inferior lo que provocará una mayor estabilidad de la herramienta y por ende una vida más larga ya que tardará más tiempo en aparecer la fatiga sobre la herramienta. Otro cambio significativo es el descenso de la temperatura, esto provocará una mayor facilidad en la fluencia de la viruta y una entrada del tiempo más suave, disminuyendo el estrés de la herramienta.

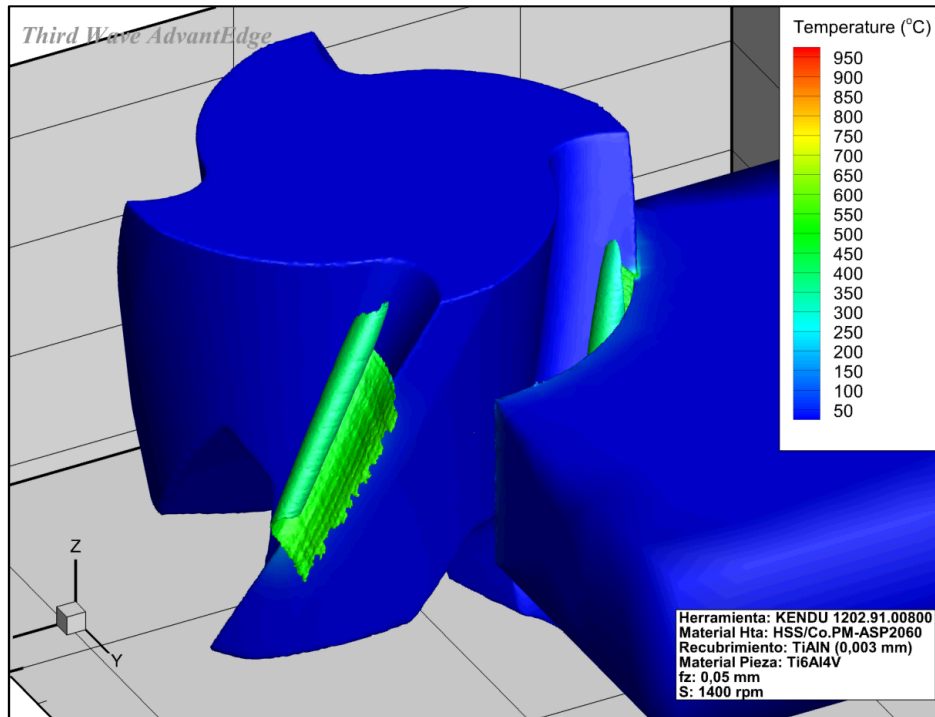


Figura 6: Distribución de la temperatura en la herramienta estudiada

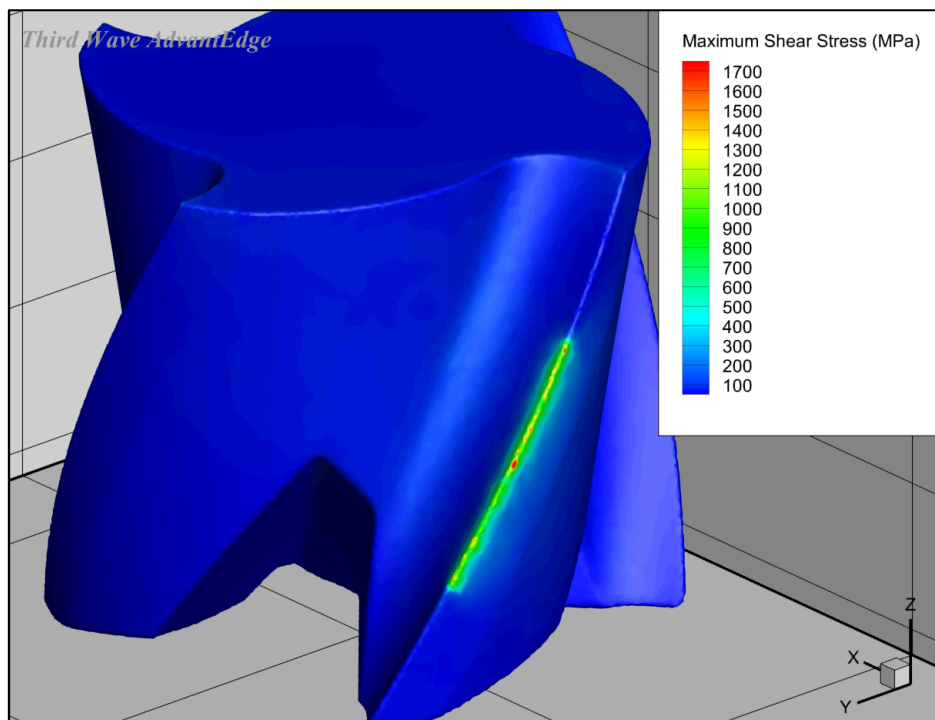


Figura 7: Distribución de las tensiones

Así, parece que la herramienta sufre daños grandes debido a los grandes esfuerzos que soporta y las altas temperaturas que se generan. De esta forma, las herramientas tienen una vida muy reducida, además, dado que la viruta aparece deformada y arrugada parece que se están generando daños porque la viruta no fluye correctamente y esta se encuentra condicionada por la geometría de la herramienta, por ello se estudiará el factor geométrico que más influye en la fluencia de la viruta, el ángulo de desprendimiento.

3.2. Mejora de la geometría de la herramienta: Análisis 2D

Se ha visto, que existe una influencia muy determinante del ángulo de desprendimiento de la herramienta. Este ángulo determina la fluencia de la viruta, pero si aumenta puede debilitar la herramienta ya que si se mantiene el alguno de incidencia conllevaría la disminución del ángulo de filo. Además se ha visto que el valor del ángulo de incidencia parece adecuado que no aparecen daños en a cara de incidencia sino en el cara de desprendimiento y filo de corte.

Por ello, se utilizarán métodos FEM 2D para analizar estos ángulos y optimizar el comportamiento de la herramienta. De esta forma, se realizará una simulación con los datos originales de la herramienta y otras dos simulaciones donde se aumente y disminuya el ángulo de desprendimiento, manteniéndose en todos los casos el ángulo de filo. En la Tabla 4 aparecen los datos de las simulaciones programadas.

Tabla 4: Ensayos FEM realizados

Simulación	Ángulo de desprendimiento (γ)	Ángulo de incidencia (α)
Original	18	8
1	20	6
2	16	10

La Figura 8 corresponde a la aproximación 2D realizada sobre un solo diente de la herramienta y un solo fragmento de viruta en las condiciones iniciales de la herramienta. Los valores máximos de temperatura aparecen a partir de la mitad del tiempo de mecanizado y en la zona de cizalladura secundaria. Aproximadamente en la misma zona aparecen los esfuerzos cortantes máximos.

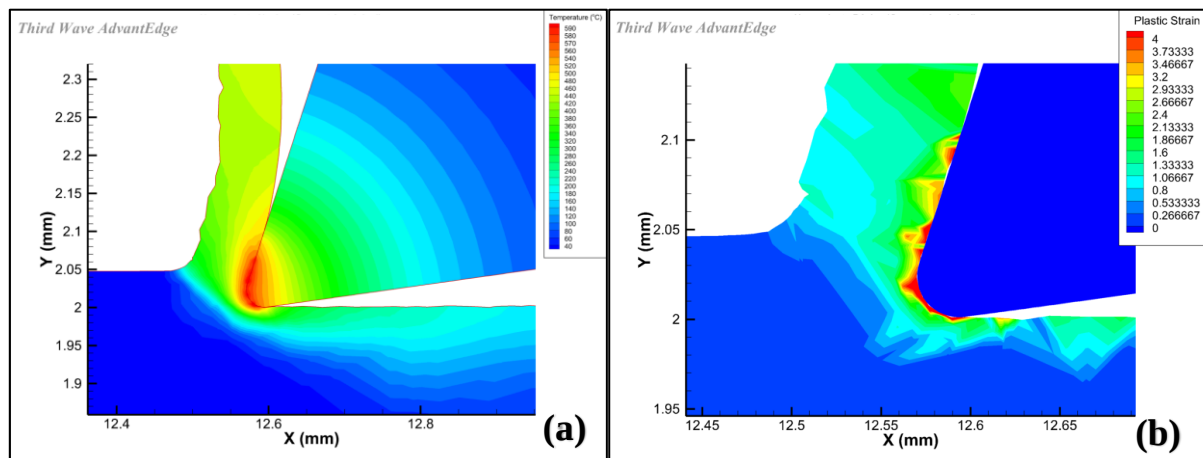


Figura 8: Simulaciones 2D de la herramienta con 18° de ángulo de desprendimiento. (a) Distribución de temperaturas. (b) Distribución de esfuerzos

Analizando los resultados de las dos simulaciones subiendo y bajando el ángulo de desprendimiento, se observa que al subir el ángulo de desprendimiento a 20°, disminuye la temperatura así como la deformación plástica. Esto puede estar unido a las dificultades de la viruta para fluir por la cara de desprendimiento que provoca un descenso del ángulo de cizalladura. Además, el Esfuerzo Cortante Máximo disminuye ligeramente aunque el descenso es algo mayor al disminuir el ángulo a 16°, sin embargo, en este caso se aprecia una subida de la deformación plástica y de la temperatura. Esto significa que el ángulo mayor favorece la fluencia de la viruta, sin embargo es curioso que el Esfuerzo Cortante Máximo no aumenta. Esto puede deberse a un efecto de compresión sobre la viruta que provocaría un aumento en la anchura de la viruta, aunque al ser un proceso de fresado esta hipótesis es compleja de verificar. En cualquier caso, el aumento del ángulo de desprendimiento parece ser beneficioso y por ello se espera que favorezca el comportamiento de la viruta.

El resumen de los resultados obtenidos, se han trasladado los resultados obtenidos a la Tabla 5.

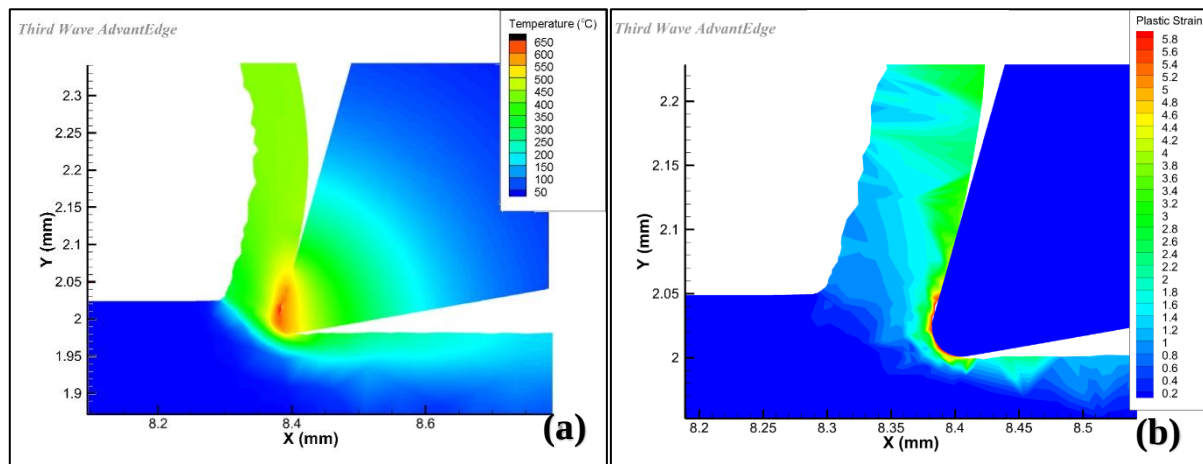


Figura 9: Simulaciones 2D de la herramienta con 16° de ángulo de desprendimiento. (a) Distribución de temperaturas. (b) Distribución de esfuerzos

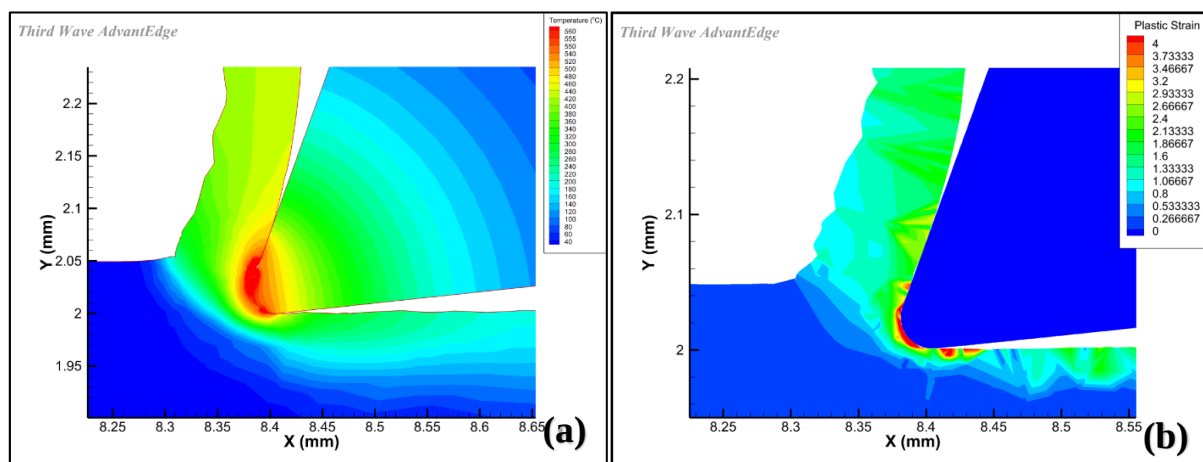


Figura 10: Simulaciones 2D de la herramienta con 20° de ángulo de desprendimiento. (a) Distribución de temperaturas. (b) Distribución de esfuerzos

De esta forma, y a partir de los resultados obtenidos, se seleccionó la configuración 1 con Ángulo de desprendimiento (γ) de 20° y Ángulo de incidencia (α) de 6°. Esta configuración se trasladó al modelo de la herramienta y se fabricó con condiciones idénticas a las encontradas en la herramienta inicial para observar el comportamiento en condiciones reales (Figura 11).

Tabla 5: Comparativa de resultados

Simulación	Ángulo de desprendimiento (γ)	Ángulo de incidencia (α)	Temperatura Máxima (Zona) [°C]	Temperatura Media [°C]	Esfuerzo Cortante Máximo (Zona) [MPa]	Fx Media [N]	Fy Media [N]
Original	18	8	657,182	566,43	3352,23 (31)	296,77	212,92
1	20	6	646,913	548,51	2629,13 (18)	283,91	199,88
2	16	10	705,863	583,26	2449,83 (14)	300,95	219,23

Al analizar la herramienta se aprecia que siguen apareciendo fallos mecánicos en la herramienta, aunque de forma general el daño sobre la herramienta es menor. En la Figura 12 se aprecia el estado general de la herramienta donde se aprecia pequeñas facturas de chipping a lo largo del filo de corte así como fracturas localizadas en el filo de la herramienta. En la Figura 13 se pueden apreciar estos defectos con mayor detalle. Como puede apreciarse, estos defectos pueden llegar a ser de un tamaño significativo pero aún así en ningún caso la herramienta llega a su fallo catastrófico.



Figura 11: Herramienta fabricada con los valores determinados a través de simulaciones

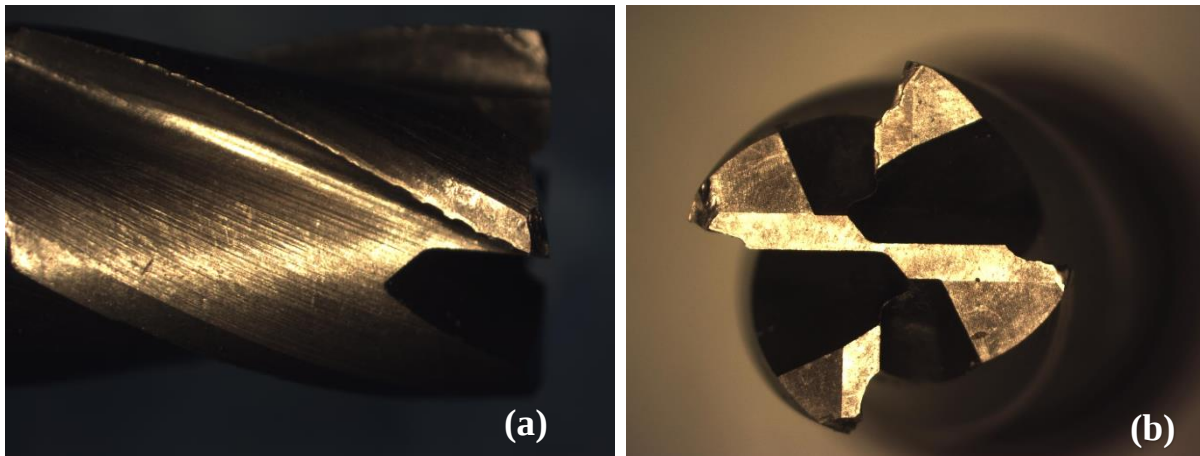


Figura 12: Herramienta rediseñada tras su uso. (a) Filo de corte de la herramienta. (b) Punta de la herramienta

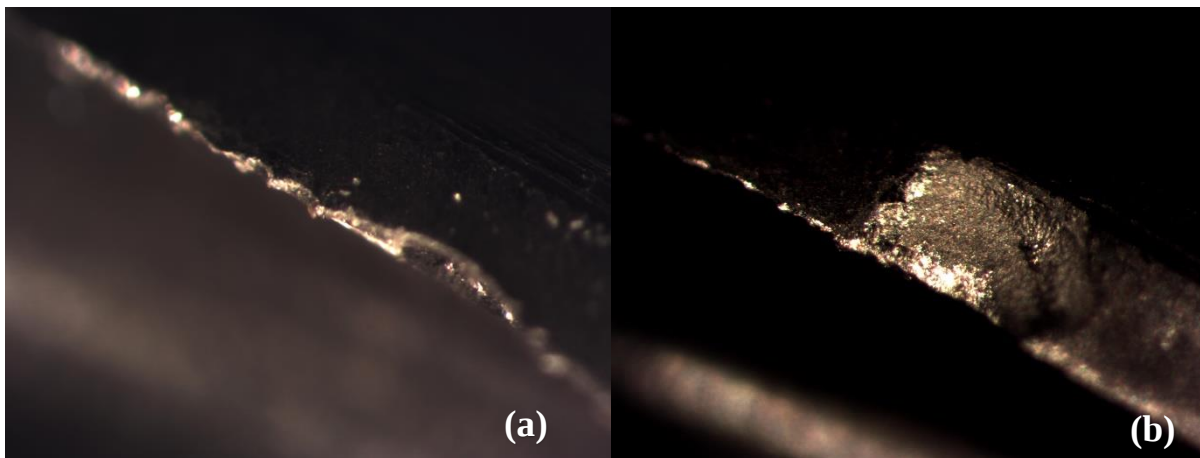


Figura 13: Detalle de la herramienta rediseñada tras su uso. (a) Chipping. (b) Fractura localizada

Se resalta que, pese a que los daños localizados son similares, incluso de tamaño, la falta de fallos catastróficos hace pensar que la herramienta se comporta mejor. Además, esos daños aparecen tras doblar la vida de la herramienta original, por ello, aún duplicando su vida, la herramienta sigue comportándose correctamente. De esta forma se puede determinar que la herramienta ha mejorado su rendimiento gracias a este rediseño basado en simulaciones.

4. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado la viabilidad del rediseño de herramientas de corte mediante simulación numérica basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM) para optimizar su rendimiento en el mecanizado

de la aleación de titanio Ti6Al4V. A partir del análisis de la herramienta comercial inicial, se ha identificado que los principales mecanismos de fallo incluyen abrasión, adhesión secundaria y fractura por fatiga debido a los altos esfuerzos mecánicos y las elevadas temperaturas generadas en la interfaz herramienta-material.

El análisis FEM ha permitido evaluar la influencia de distintos parámetros geométricos sobre el comportamiento de la herramienta, en particular el ángulo de desprendimiento. A través de simulaciones 2D y 3D, se ha determinado que un aumento de dicho ángulo hasta 20° junto con una reducción del ángulo de incidencia a 6° optimiza la fluencia de la viruta, reduce la temperatura máxima en la zona de corte y distribuye de manera más uniforme los esfuerzos cortantes. Estos resultados se han validado mediante la fabricación y prueba de una herramienta con la configuración óptima obtenida, mostrando una mejora significativa en la estabilidad del proceso y en la vida útil de la herramienta.

Las pruebas experimentales han confirmado que la herramienta optimizada duplica la vida útil respecto a la herramienta original, reduciendo la aparición de fallos catastróficos y minimizando la degradación térmica y mecánica. Aunque los mecanismos de desgaste siguen presentes, su progresión es más uniforme y controlada, lo que permite un mayor aprovechamiento de la herramienta antes de su sustitución.

En conclusión, el uso de simulaciones FEM en el rediseño de herramientas de corte se ha demostrado como una metodología eficaz para mejorar la eficiencia del mecanizado de Ti6Al4V, proporcionando una solución viable frente a los problemas asociados a la baja maquinabilidad de esta aleación. La optimización geométrica de la herramienta permite reducir esfuerzos y temperaturas en la zona de corte, incrementando así su estabilidad y vida útil en entornos industriales reales. Estos resultados abren la posibilidad de futuras investigaciones orientadas a la optimización de otros parámetros geométricos y al análisis de recubrimientos avanzados que complementen la estrategia de diseño aquí propuesta.

5. Referencias

- [1] Khan M.K., Wang Q.Y., “Investigation of crack initiation and propagation behavior of AISI 310 stainless steel up to very high cycle fatigue”, *International Journal of Fatigue* **54**, 38–46 (2013)
- [2] ASM Metals Handbook v.9, “Metallography and Microstructures”, ASM International, Ohio, Estados Unidos, 2004
- [3] Ulutan D., Ozel T., “Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* **51**, 250–280 (2011)
- [4] Choudhury I.A., El-Baradie M.A., “Machinability of nickel-base super alloys: a general review”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* **77**, 278-284 (2013)
- [5] Durdu S., Deniz Ö., Kutbay I., Usta M., “Characterization and formation of hydroxyapatite on Ti6Al4V coated by plasma electrolytic oxidation”, *Journal of Alloys and Compounds* **551**, 422-429 (2012)
- [6] Ponce M.B., Vazquez-Martinez J.M., Davim J.P., Gomez J.S., “Analysis of secondary adhesion wear mechanism on hard machining of titanium aerospace alloy”, *Materials*, **12** (12), 2015 (2019)
- [7] Vasylyev M., Chenakin S., Yatsenko L., “Ultrasonic impact treatment induced oxidation of Ti6Al4V alloy”, *Acta Materialia*, **103**, 761-774 (2016)
- [8] Holguín G.A., Cano M.F. Ruden A., González J.M., Jurado P.A., Sequeda F., “Estudio de las propiedades mecánicas, tribológicas y superficiales de recubrimientos duros basados en titanio”, *Rev. LatinAm. Metal. Mater.* **33**. 2 (2013)
- [9] Arrando F., Bassas J., Alcobé X., Esteve J., “Residual stress in Ti(C,N) coatings on HSS substrate”, *Materials Science Forum*, **228-231**, 317–322 (1996)
- [10] Batista M., Morales A., Gómez-Parra A., Salguero J., Puerta F.J., Marcos M., “3D-FEM Based Methodology for Analysing Contour Milling Processes of Ti Alloys”, *Procedia Engineering* **132**, 1136-1143 (2015)
- [11] Huang P.L., Feng Li J., Sun J., Zhou J., “Study on performance in dry milling aeronautical titanium alloy thin-wall components with two types of tools”, *Journal of Cleaner Production* **67**, 258-264 (2014)