

Estudio comparativo de la maquinabilidad de las aleaciones de titanio Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al

I. Sacristán Pérez, A. Garay Araico, L.-M. Iriarte Grutzeta, P.-J. Arrazola Arriola

Línea de Investigación de mecanizado de Alto Rendimiento, Mondragon Goi Eskola Politeknikoa

pjarrazola@mondragon.edu

Palabras clave: Maquinabilidad, Ti-6Al-4V, Ti-10V-2Fe-3Al, fuerzas, temperaturas, fin de vida, virutas

Ti-10V-2Fe-3Al es una aleación de titanio β desarrollada en los últimos años y cuyo uso en el sector aeronáutico está creciendo de manera importante debido a su buena combinación de resistencia y tenacidad que se mantiene incluso a elevadas temperaturas. Para este estudio se ha realizado un análisis comparativo de la maquinabilidad de las aleaciones Ti-10V-2Fe-3Al y la aleación de referencia, Ti-6Al-4V. Se han hecho dos tipos de ensayo: (1) ensayos de fin de vida para definir la vida de herramienta y (2) ensayos de corte ortogonal para analizar fuerzas, temperaturas y virutas durante el mecanizado, con la finalidad de establecer una relación entre los resultados de ambos ensayos. Solamente se ha evaluado la influencia de la velocidad de corte y el avance por vuelta sobre estos parámetros de salida, manteniéndose constante la profundidad de pasada. Los resultados concluyen una peor maquinabilidad del Ti-10V-2Fe-3Al tanto en ensayos de fin de vida como en corte ortogonal.

1. INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de nuevos modelos de avión en los últimos años, se ha producido un importante aumento en la demanda de las aleaciones de titanio. Su elevada resistencia específica, excelente resistencia a la corrosión, y buen comportamiento a fatiga, que se mantienen a elevadas temperaturas, hacen que sean muy adecuadas para su uso en el sector aeronáutico [1], con el fin de reducir el peso de los componentes y, a su vez, minimizar el consumo de combustible. Además, a diferencia de las aleaciones de aluminio, también muy empleadas en componentes aeronáuticos, no generan par galvánico en contacto con la fibra de carbono, otro material muy empleado en este sector, dando lugar a un mejor comportamiento a corrosión.

A pesar de sus excelentes propiedades mecánicas, su uso se ve limitado por el elevado coste de la materia prima y la fabricación de los componentes. Debido a su baja conductividad térmica y elevado calor específico, elevada reactividad química y bajo límite elástico, las aleaciones de titanio se clasifican entre los materiales más difíciles de mecanizar [2]. A pesar de que en los últimos años se han desarrollado nuevas herramientas de corte para estos materiales, todavía existen dificultades a la hora de trabajar con herramientas adecuadas y condiciones de corte optimizadas, lo que supone una barrera de cara a la productividad.

Hasta ahora, el 50% de la producción de titanio corresponde a la aleación Ti-6Al-4V, del tipo $\alpha+\beta$ [1]. Pero el uso de aleaciones de tipo β , como el Ti-10V-2Fe-3Al, está aumentando de forma importante, reemplazando al Ti-6Al-4V en muchos componentes en los que se exigen elevada resistencia y tenacidad a altas temperaturas, como puede ser el caso del tren de aterrizaje. A diferencia de las aleaciones de tipo α , las β pueden ser térmicamente tratadas para conseguir diferentes combinaciones de propiedades mecánicas.

Se han realizado estudios de maquinabilidad de aleaciones de titanio para determinar los parámetros que afectan en su mecanizado. Kosaka y Fox [3] realizaron un estudio comparativo de la maquinabilidad de las aleaciones $\alpha+\beta$, Ti-6Al-4V y Ti54M (TIMETAL®54M), y observaron la influencia de la microestructura en la maquinabilidad de las mismas. En cuanto a las aleaciones β , gran parte de los estudios realizados se han centrado en caracterizar la microestructura del material. Settefrati et al. [4] y Ankem y Greene [5] estudiaron las diferentes transformaciones de fase que se producen en las β bajo

diferentes tratamientos térmicos, mientras que Duerig *et al.* [6] trataron de relacionar su microestructura y propiedades mecánicas. En cuanto al comportamiento frente al mecanizado de este tipo de aleaciones, Arrazola *et al.* [7] llevaron a cabo un estudio comparativo entre las aleaciones Ti555.3 y Ti-6Al-4V, en el que se observó una mejor maquinabilidad de la aleación $\alpha+\beta$. Además de ello, el mismo equipo [8] determinó el ratio de maquinabilidad del Ti17, Ti555.3, Ti-10V-2Fe-3Al y Ti-6Al-4V, en el que la maquinabilidad de esta última aleación resultó ser un 13%, 25% y 44% mejor que la del Ti-10V-2Fe-3Al, Ti17 y Ti555.3, respectivamente. De la aleación Ti-10V-2Fe-3Al, no se conocen apenas datos referentes a su maquinabilidad.

Es por ello que en este estudio se realiza un análisis comparativo de la maquinabilidad de las aleaciones Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al, mediante ensayos de fin de vida y corte ortogonal. El objetivo es encontrar una coherencia entre los resultados en ensayos de fin de vida y las fuerzas, temperaturas y virutas analizadas en corte ortogonal, para comprender y optimizar la maquinabilidad de las aleaciones a estudio.

2. PLAN EXPERIMENTAL

2.1 Material

Ti-6Al-4V es una aleación que pertenece al grupo $\alpha+\beta$, mientras que Ti-10V-2Fe-3Al se incluye en el grupo β . El elevado porcentaje de elementos β estabilizadores (V y Fe) disminuyen la temperatura β transus del Ti-10V-2Fe-3Al. Como se muestra en la Tabla 1, la diferencia en cuanto a propiedades mecánicas no es significativa. Ambas aleaciones pueden ser térmicamente tratadas para aumentar su resistencia, en el caso de las $\alpha+\beta$ mediante transformación martensítica y en el caso de las β mediante tratamiento de precipitación.

Material	Tratamiento Térmico	Propiedades Mecánicas			Composición química (% en peso)					β (°C) Transus
		R _m (MPa)	R _{p0.2} (MPa)	A (%)	Al	Mo	V	Fe	O	
Ti-6Al-4V	Recocido (750°C)	970	900	13	6	-	4	0.15	0.18	995
Ti-10V-2Fe-3Al	Recocido (760°C)	960	890	10	3	-	10	2	0.13	800

Tabla 1. Características de los materiales Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al

En cuanto a microestructura, la aleación Ti-6Al-4V (Figura 1a), contiene gruesos granos equiáxicos de α primaria con β laminar transformada en junta de grano. La microestructura del Ti-10V-2Fe-3Al (Figura 1b), está típicamente formada por granos de α globular y acicular en una matriz β .

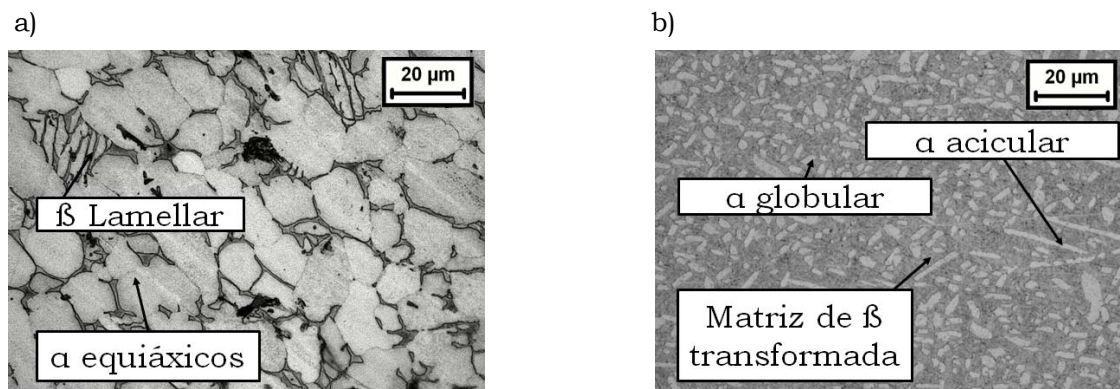


Figura 1. Microestructuras del a) Ti-6Al-4V y b) Ti-10V-2Fe-3Al

2.2 Metodología de Ensayos

Se han realizado dos tipos de ensayo: de fin de vida, cuyos resultados corresponden a un punto de vista más industrial; y de corte ortogonal, en los que las variables de salida (fuerzas, temperatura y virutas) proporcionan un punto de vista más científico. El set-up para ambos ensayos se muestra en la figura 2.

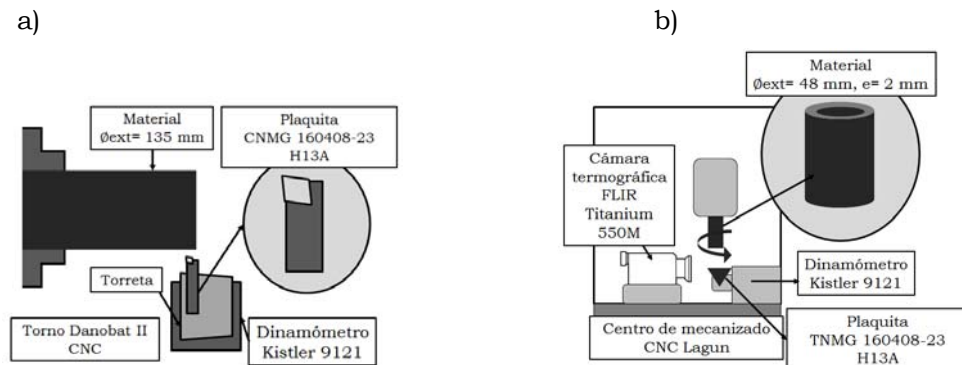


Figura 2. Set-up experimental de a) Ensayos de fin de vida, b) Corte ortogonal

2.2.1 Ensayos de fin de vida

Para los ensayos de fin de vida se ha empleado el torno Danobat II CNC, con refrigerante Hotcut 3380E. En la Figura 2a se muestra el set-up de ensayos, y en la tabla 2 un resumen de las condiciones de trabajo empleadas. Por una parte, siguiendo como criterio la norma ISO3685, se ha determinado la velocidad para la que la herramienta alcanza su fin de vida (cuando el desgaste de flanco de 0,3 mm) tras 15 minutos mecanizando. Los ensayos se han realizado con las plaquetas CNMG 10408-23 H13A (grado K 15) y el desgaste de las mismas se ha medido en el Macroscopio Leica Z16 APO. Previamente, todas las plaquetas han sido examinadas en el perfilómetro Sensofar PL μ con el fin de controlar el radio de arista, que se mantiene en 34 ± 2 μ m. Además, se han medido también las fuerzas específicas de corte.

	Parámetro	Fin de Vida	Corte ortogonal
Condiciones de corte	Velocidad de corte (V_c) (m/min)	40 - 90	40 y 80
	Avance por vuelta (f_v) (mm)	0,1	0,1, 0,15, 0,25
	Profundidad de corte (p) (mm)	2	
Herramientas de corte Porta-herramientas (HSK-A63)	Plaqueta	CNMG 160408-23 H13A	TNMG 160408-23 H13A
	Ángulo de desprendimiento (α_0)	7°	
	Redondeo de arista (r_s) (μ m)	34 \pm 2	
	Rompevirutas	-15	
	Grado	K15 micrograno	
Refrigerante		Hocut 3380E	En Seco
Pieza	Material	Ti-6Al-4V / Ti-10V-2Fe-3Al	
	Diámetro exterior (mm)	135	48
Máquina		Torno Danobat II CNC	Centro de mecanizado Lagun CNC

Tabla 2. Herramientas, materiales y condiciones de corte para los ensayos

2.2.2 Ensayos de corte ortogonal

Los ensayos de corte ortogonal se han realizado en el centro de mecanizado vertical Lagun. El corte ortogonal se produce cuando el movimiento relativo entre pieza y herramienta es perpendicular. El set-up experimental se muestra en la figura 2b. Las plaquitas empleadas son TNMG 16 0408-23 H13A. Las probetas para corte ortogonal son tubos con un diámetro externo de 48 mm y espesor de pared de 2 mm. Se han hecho ensayos a dos velocidades diferentes (40 y 80 m/min) y con tres diferentes avances por vuelta (0,1, 0,15 y 0,25 mm), como se muestra en la tabla 2.

Mediante el dinamómetro Kistler 9121 de tres componentes situado en el porta-herramientas, se han medido las variaciones dinámicas en fuerzas de corte durante el mecanizado, con un error de $\pm 4\%$. Para cada uno de los ensayos se ha utilizado una arista de corte nueva, para que fenómenos de desgaste no interfieran en la medición de las fuerzas.

Para medir la temperatura en la cara de desprendimiento, se ha utilizado la cámara FLIR Titanium 550 M. Se ha medido el valor de la temperatura de 30 píxeles (resolución espacial de 10 μm) a lo largo de la cara de desprendimiento, calculando el valor medio de las mismas para representar la temperatura en la herramienta. Las mediciones tienen una incertidumbre de $\pm 6\%$ [9].

3. RESULTADOS

3.1 Ensayos de fin de vida: Vida de herramienta y fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k)

La Figura 3a muestra el desgaste de flanco-versus-velocidad de corte, en ensayos de fin de vida. La línea horizontal que se sitúa en $V_b = 0,3$ mm representa el fin de vida en la herramienta para el criterio elegido. La Figura 3b muestra las fuerzas específicas a diferentes velocidades de corte medidas durante el ensayo.

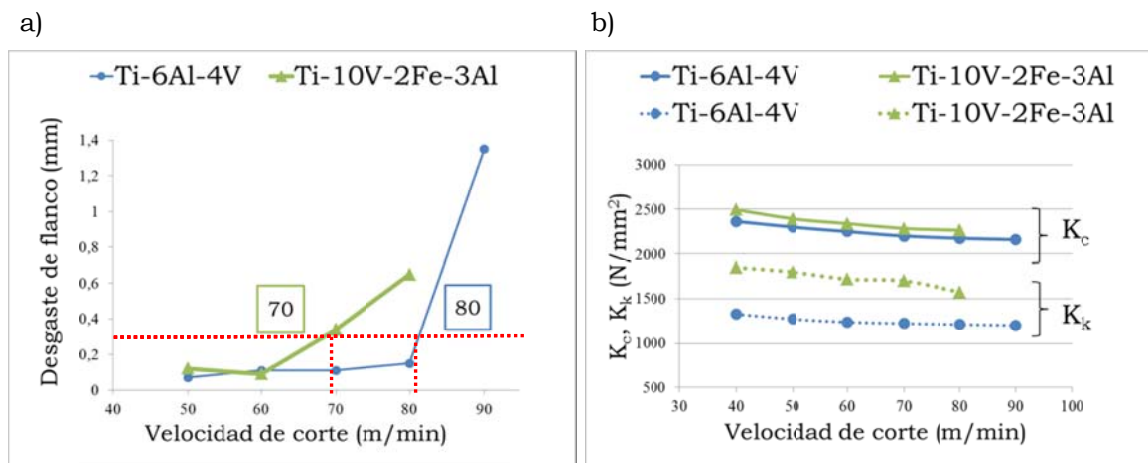


Figura 3. Ensayos de fin de vida a) definición de V_{cmax} para mecanizar durante 15 minutos, b) Fuerzas específicas vs velocidad de corte

3.2 Ensayos de corte ortogonal: Fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k)

En la Figura 4 se representan los valores de fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k) al mecanizar Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al, a $V_c = 40$ y 80 m/min respectivamente. Para reducir el grado de incertidumbre de los ensayos se han realizado tres repeticiones. En las gráficas se muestra el valor medio de fuerza específica y la representación de la desviación en la forma 2σ .

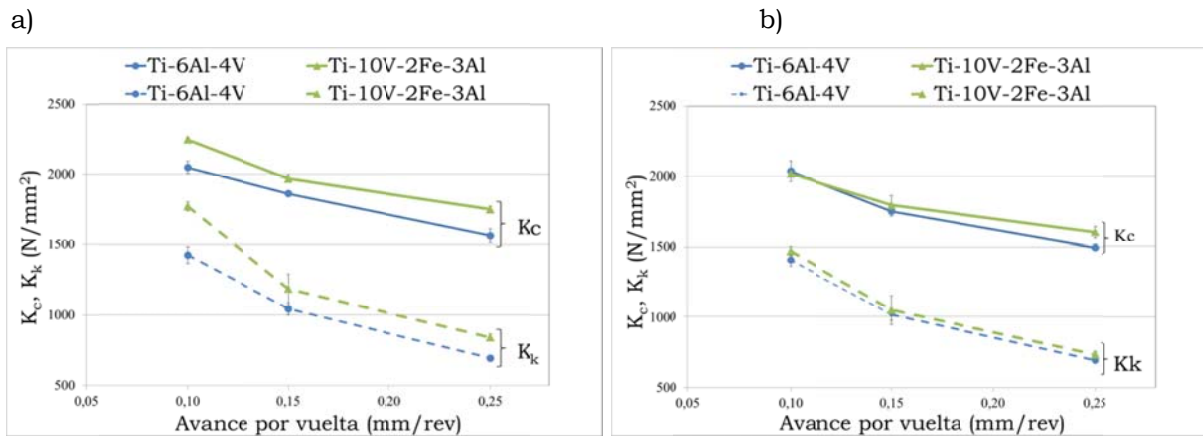


Figura 4. Fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k) a) $V_c = 40$ m/min y b) 80 m/min

3.3 Ensayos de corte ortogonal: Temperatura

En la Figura 5 se muestra el valor de temperatura en la cara de desprendimiento medido al mecanizar ambas aleaciones a $V_c = 40$ y 80 m/min y un mapa térmico representativo de uno de los ensayos realizados en el Ti-10V-2Fe-3Al.

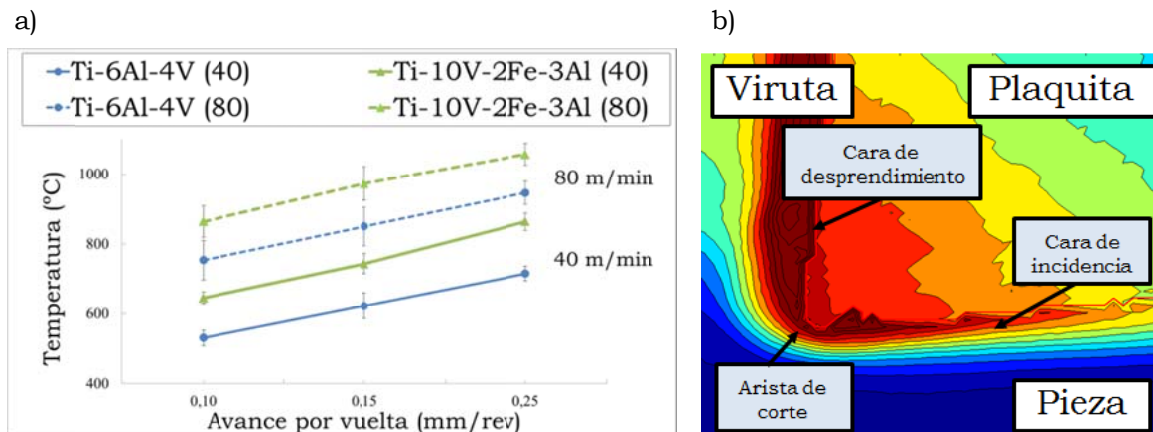


Figura 5. a) Temperaturas en la cara de desprendimiento a $V_c = 40$ y 80 m/min b) Mapa térmico de Ti-10V-2Fe-3Al a $V_c = 40$ m/min, $f_v = 0.1$ mm

3.4 Ensayos de corte ortogonal: Análisis de las virutas

En la figura 6 se observan las secciones de las virutas de Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al, obtenidas tras mecanizar a $V_c = 80$ m/min y $f_v = 0,1$ mm, por ser la velocidad más crítica que se ha ensayado. Por otro lado, en la figura 7, se muestra como ejemplo la viruta obtenida tras mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al a $V_c = 40$ m/min y $f_v = 0.1$ mm, para poder comparar la morfología de la viruta en diferentes condiciones de corte.

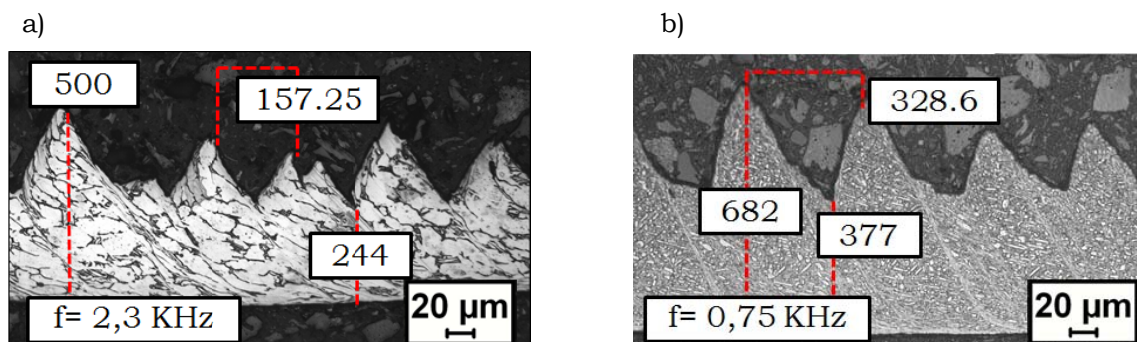


Figura 6. Sección de viruta a $V_c = 80$ m/min, $f_v = 0.1$ mm de a) Ti-6Al-4V, b) Ti-10V-2Fe-3Al

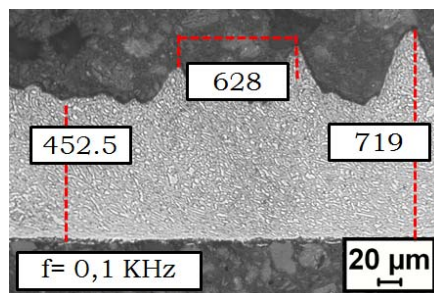


Figura 7. Sección de viruta a $V_c = 40$ m/min, $f_v = 0.1$ mm de Ti-10V-2Fe-3Al

Las virutas han sido recogidas durante el corte ortogonal, y corresponden a una porción de la zona intermedia a lo largo de la longitud de la viruta. Para observar la microestructura se han lijado y pulido las muestras, previamente engastadas, y finalmente se han atacado con una adaptación del reactivo de Kroll (6ml HNO_3 + 4ml HF + 20ml H_2O).

Para el análisis de la viruta se han medido distancia entre picos, espesor de viruta (máximo y mínimo), con el que se ha calculado el valor medio, y frecuencia de la viruta segmentada, como se muestra en la tabla 3.

	Ti-6Al-4V	Ti-10V-2Fe-3Al
Distancia entre picos (μm)	157,25	328,6
Espesor de viruta máximo (μm)	500	682
Espesor de viruta mínimo (μm)	244	377
Espesor de viruta medio (μm)	372	530
Frecuencia de segmentación (KHz)	2,3	0,75

Tabla 3. Parámetros de la morfología de la sección de viruta

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Ensayos de fin de vida: Vida de herramienta y fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k)

Como se representa en la Figura 3a, los valores de V_{cmax} para el Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al son aproximadamente 80 y 70 m/min respectivamente. El que Ti-10V-2Fe-3Al tenga un valor más bajo para las mismas condiciones implica una menor maquinabilidad.

En la Figura 3b se observan valores de fuerza específica de corte muy similares para las dos aleaciones, aunque siempre mayores en el Ti-10V-2Fe-3Al. El máximo valor de K_c es 2495 N/mm^2 , que se alcanza al mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al a $V_c = 40$ m/min y $f_v = 0,1$ mm/rev. El valor de K_c en el Ti-6Al-4V bajo las mismas condiciones de corte es de 2365 N/mm^2 , alrededor de un 5% menor. El máximo valor de la fuerza específica de avance (K_k) para el Ti-10V-2Fe-3Al es de 1850 N/mm^2 , también a $V_c = 40$ m/min y $f_v = 0,1$ mm/rev, mientras que para el Ti-6Al-4V es de 1325 N/mm^2 , aproximadamente un 30% menor. Las fuerzas de corte dependen mayormente de las propiedades mecánicas del material, sin embargo, en las de avance intervienen también fenómenos de rozamiento. Como en este caso las propiedades mecánicas de los materiales son similares, la diferencia entre fuerzas es más apreciable en fuerzas específicas de avance que en las de corte. Por tanto, se podría esperar que al mecanizar la aleación β exista un mayor rozamiento que en las $\alpha+\beta$, lo cual también podría justificar en parte el desgaste más prematuro de las herramientas.

4.2 Ensayos de corte ortogonal: Fuerzas específicas de corte (K_c) y de avance (K_k)

En la Figura 4 se observan valores de K_c y K_k ligeramente mayores al mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al a 40 m/min. Al aumentar la velocidad de corte a 80 m/min, las diferencias entre las dos aleaciones son menores e incluso a $f_v = 0,1$ mm/rev, se observa una ligeramente mayor K_c en Ti-6Al-4V (20 N/mm^2 mayor). Los máximos valores de K_c y K_k se han medido al mecanizar

Ti-10V-2Fe-3Al a 40 m/min y $f_v = 0,1$ mm/rev. En el caso de K_c , los valores son 2248 N/mm² para el Ti-10V-2Fe-3Al y 2047 N/mm² para el Ti-6Al-4V (un 10% menor), y en el caso de K_k , 1769 N/mm² para el Ti-10V-2Fe-3Al y 1426 N/mm² (un 25% menor) para el Ti-6Al-4V. Estos resultados se corresponden con las tendencias observadas en fin de vida.

Las fuerzas específicas de corte disminuyen con el aumento de la velocidad de corte. Esto puede atribuirse a una reducción del espesor de la viruta, tal y como se comprobó tras medir las virutas.

Al aumentar el avance por vuelta (Figura 4) se observa una disminución de fuerzas específicas de corte en ambas velocidades, debido a un menor efecto del radio de la arista de corte.

4.3 Ensayos de corte ortogonal: Temperatura

En la Figura 5 se aprecia un incremento de la temperatura en la cara de desprendimiento al mecanizar ambas aleaciones al aumentar tanto la velocidad de corte como el avance por vuelta. Las mayores temperaturas se alcanzan siempre al mecanizar la aleación Ti-10V-2Fe-3Al. El máximo valor alcanzado es de unos 1060 °C al mecanizar a 80 m/min y $f_v = 0,25$ mm/rev. Este valor es alrededor de un 10% mayor que en el Ti-6Al-4V (947°C) en las mismas condiciones. Considerando el error del dispositivo ($\pm 6\%$), se concluyen mayores temperaturas al mecanizar la aleación del tipo β . A 40 m/min, las temperaturas son menores. El máximo para Ti-10V-2Fe-3Al es 864°C y para el Ti-6Al-4V 715 °C. La diferencia entre la temperatura al mecanizar Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al es siempre de aproximadamente 120°C.

Las mayores temperaturas medidas en la aleación Ti-10V-2Fe-3Al, se corresponden con mayores fuerzas específicas de corte.

4.4 Análisis de las virutas

Al mecanizar a $V_c = 40$ m/min, se ha observado una morfología de viruta similar en ambas aleaciones, exenta de bandas de cizalladura adiabáticas (figura 7). Pero a $V_c = 80$ m/min (figura 6) aparece viruta segmentada tanto en el Ti-6Al-4V como en el Ti-10V-2Fe-3Al. Al mecanizar a elevadas condiciones de corte, la cantidad de calor que se genera en la zona de corte es mucho mayor, y como la conductividad de las aleaciones de titanio es baja, el calor no es evacuado eficientemente, produciendo un posible ablandamiento local del material que favorece la formación de bandas de cizalladura adiabáticas y de viruta segmentada.

Comparando la morfología de las virutas, se observa que la distancia medida entre picos es menor en la aleación $\alpha + \beta$ (unos 160 μm), que en la β (unos 330 μm). Por tanto, la frecuencia de viruta segmentada es menor en el Ti-10V-2Fe-3Al (0,75 KHz), que en el Ti-6Al-4V (2,3 KHz). Además el espesor de viruta medio también es mayor en el Ti-10V-2Fe-3Al (550 μm) que en Ti-6Al-4V (400 μm), por lo que las fuerzas específicas de corte también van a ser mayores. En la figura 8 se observa que las bandas de cizalladura son mucho más pronunciadas en la aleación de tipo β .

5. CONCLUSIONES

Al comparar la maquinabilidad de las aleaciones Ti-6Al-4V y Ti-10V-2Fe-3Al se extraen las siguientes conclusiones:

- Ti-6Al-4V tiene una maquinabilidad un 12% mayor que el Ti-10V-2Fe-3Al, según el valor de $V_{c_{max}}$ definido en los ensayos de fin de vida.
- En cuanto a la medición de fuerzas de corte, se observa buena correlación entre los resultados obtenidos en fin de vida y en corte ortogonal, ya que las tendencias son las mismas: Las fuerzas específicas de corte y de avance disminuyen con el aumento de la velocidad de corte. Esto puede ser debido a un ablandamiento local del material antes de ser mecanizado. Las fuerzas específicas también aumentan al disminuir el avance debido a un posible efecto de arista de corte.
- Tanto en ensayos de fin de vida como en corte ortogonal, se obtienen fuerzas de corte

similares pero ligeramente (10%) superiores al mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al. Esto se debe a la similitud en cuanto a propiedades mecánicas entre las dos aleaciones. Las diferencias son más notables en K_k . Esto se traduce en una mayor sensibilidad a los efectos de fricción en la cara de desprendimiento al mecanizar la aleación β .

- Existe una clara relación entre la temperatura y la maquinabilidad. Se alcanzan mayores temperaturas al mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al (alrededor de 120° mayores en todas las condiciones). Debido a las bajas propiedades térmicas de las aleaciones de titanio, al aumentar las condiciones de corte el calor generado durante el mecanizado no puede ser disipado de forma efectiva, y se concentra muy cerca de la punta de la herramienta lo que da lugar a un desgaste prematuro de la herramienta.
- Para la velocidad de corte estudiada, se observan bandas de cizalladura adiabáticas en las dos aleaciones. Al ser mayor el espesor de viruta en el Ti-10V-2Fe-3Al, se esperan mayores fuerzas de corte, y por tanto mayores temperaturas al mecanizar. A pesar de que la frecuencia de bandas de cizalladura es mayor en el Ti-6Al-4V, en el Ti-10V-2Fe-3Al se forman bandas mucho más pronunciadas, lo que se correlaciona con los resultados obtenidos en fuerzas tanto en corte ortogonal como en fin de vida, en los que se observa la repercusión de los fenómenos de fricción en las fuerzas específicas de avance. El que al mecanizar Ti-10V-2Fe-3Al las bandas de cizalladura sean más pronunciadas también se corresponde con los resultados en temperatura, ya que al estar la herramienta sometida a mayores cargas termomecánicas, las temperaturas en la herramienta sean mayores.
- Al no aparecer viruta segmentada a $V_c = 40$ m/min, se concluye que un aumento de las condiciones de corte supone una morfología de viruta más segmentada.

3 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Gobierno Vasco el apoyo económico recibido en los proyectos PROFUTURE I (Código IE10-271) y PROFUTURE II (Código IE11-308), el cual ha permitido la realización de este trabajo de investigación.

4 REFERENCIAS

- [1] A. Armendia, A. Garay, L.M. Iriarte, P.J. Arrazola. *Comparison of the Machinabilities of Ti-6Al-4V and TIMETAL® 54M Using Uncoated WC-Co Tools*, J. Materials Processing Technology, 210 (2010), 197-203.
- [2] R.A. Rahman Rashid, S. Sun, G. Wang, M.S. Dargush. *Machinability of a near beta titanium alloy*, IMechE Vol. 000 Part B.
- [3] Y. Kosaka, S.P. Fox. *Influences of Alloy Chemistry and Microstructure on the Machinability of Titanium Alloys. Cost Affordable Titanium*, TMS Conference, (2004), 169-176.
- [4] A. Settefrati, E. Aeby-Gautier, M. Dehmas, G. Geandier, B. Appolaire, S. Audion, J. Delfosse. *Precipitation in near β titanium alloy on ageing: Influence of heating rate and chemical composition of the β -metastable phase*, Solid State Phenomena, 172-174 (2011), 760-765.
- [5] S. Ankem, C.A. Greene. *Recent developments in microstructure/ property beta titanium alloys*, Materials Science and Engineering, A263 (1999), 127-131.
- [6] T.W. Duerig, G.T. Terline, J. Williams. *Phase Transformations and tensile Properties of Ti-10V-2Fe-3Al*, American Society for Metals, 11A (1980).
- [7] M. Armendia, P.J. Arrazola, A. Garay, L.M. Iriarte, S. Marya, F. Le Maître. *Machinability of titanium alloys (Ti-6Al-4V and Ti555.3)*, Journal of materials processing technology, 209 (2009), 2223-2230.
- [8] P.J. Arrazola, M. Armendia, L.M. Iriarte, A. Garay, P.X. Aristimuño, J. Aperribay. *Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronáutica (Parte II)*, IMHE Marzo, 345 (2008), 28-33.
- [9] D. Soler, L.M. Iriarte, P.J. Arrazola. *Temperature Measurements in Orthogonal Cutting of Titanium Alloys*, (2012).