

## Modelización y validación de las tensiones residuales inducidas por aleaciones de aeronáutica

I. Izeta Lizarralde<sup>(1)</sup>, P.-J. Arrazola Arriola<sup>(1)</sup>, J.C. Outeiro<sup>(2)</sup>

(1) Facultad de ingeniería. Universidad de Mondragón, Mondragón, España  
pjarrazola@mondragon.edu

(2) Facultad de ingeniería. Universidad Católica de Portugal, Lisboa, Portugal

---

*El proceso de mecanizado es uno de los procesos de elaboración más empleados en la fabricación de componente, especialmente en sectores de alta competencia como la aeronáutica o la automoción. Aunque en los últimos años se hayan hecho grandes avances, todavía hay aspectos relativamente complejos, como es el caso de las tensiones residuales que se generan en la superficie debido a los diferentes procesos de mecanizado.*

*La tensión residual es uno de los parámetros más importante utilizado para evaluar la calidad de la superficie mecanizada. Actualmente, estos procesos de optimización se realizan sobre piezas reales utilizando costoso métodos de prueba y error.*

*Este proyecto consiste en desarrollar y validar modelos de elementos finitos para la predicción de tensiones residuales en un proceso de torneado de una aleación de titanio: Ti-6Al-4V. El trabajo se ha dividido en dos fases. La primera fase, se ha centrado en el desarrollo de modelos para la predicción de tensiones residuales en el proceso de torneado del material antes mencionado. Para ello, se va ha empleado el programa de elementos finitos comercial DEFORM 3D. En la segunda fase, se ha centrado en la determinación experimental de las fuerzas, temperaturas, la geometría de la viruta, el desgaste de la herramienta y tensiones residuales, inducidas por el proceso de torneado de la aleación antes mencionada.*

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de mecanizado tienen una gran relevancia en sectores de gran competitividad como la aeronáutica o la automoción. Es sabido que en estos sectores, las demandas de la calidad en las superficies mecanizadas (tolerancias, acabados superficiales, integridad superficial...) son más restrictivas que en otros sectores, debido a las condiciones de trabajo a las que las piezas son sometidas y la seguridad requerida.

Aunque se han hecho grande progresos en estos últimos años, uno de los aspectos más complejos es de la generación de tensiones residuales. En procesos como el torneado o el fresado las cargas termo mecánicas dan lugar a deformaciones plásticas y temperaturas elevadas en la superficie de la pieza que se ha mecanizado. Esta es la razón por lo que aparecen ha aparecer tensiones residuales mientras la pieza se encuentra en proceso de enfriamiento y relajación.

Las tensiones residuales pueden mejorar o deteriorar la capacidad de un componente de soportar las condiciones de carga en servicio (fatiga, corrosión, etc.), dependiendo de su naturaleza: compresión o tracción, respectivamente.

Las tensiones residuales es uno de los criterios empleados para evaluar la calidad de la superficie mecanizada, en particular cuando los componentes son críticos. Este es el caso de bastantes componentes realizados en aleaciones de inconel y titanio, las cuales son frecuentemente utilizadas en la industria aeronáutica. Ambas aleaciones tienen altas propiedades mecánicas y presentan elevados endurecimientos durante su mecanizado, combinado con una baja conductividad térmica. Como consecuencia, se generan fuerzas de corte y temperaturas elevadas alrededor de la arista de corte, por supuesto en la superficie

mecanizada, lo que da lugar a valores de tensiones residuales tractivas elevadas (a veces llega a más de 1000 MPa a la superficie mecanizada) [1].

La fiabilidad en este tipo de componentes es de vital importancia, más aún si su fallo podría conducir a la pérdida de vidas humanas. Teniendo en cuenta que dichos fallos se generan en general por fallo a fatiga, los valores de tensiones residuales presentes en la pieza después del mecanizado es un tema clave.

En la actualidad, los modelos basados en elementos finitos, a pesar de las limitaciones existentes (identificación de parámetros de entrada, validación, tiempo de cálculo...) se presentan como una alternativa a los métodos empíricos, donde el coste y tiempo empleado en la obtención de resultados es elevado.

Una de las cuestiones que se plantea en la validación, es que dicha comparación tiene sentido si las condiciones del modelo corresponden con gran exactitud a las condiciones de los ensayos empíricos.

El objetivo de este proyecto es desarrollar y validar modelos para la predicción de tensiones residuales en el mecanizado de la aleación de titanio, Ti-6Al-4V [2-3].

## 2. SIMULACIONES FEM

El programa empleado para la predicción de tensiones residuales es el programa comercial DEFORM 3D. En primer lugar, se ha recogido algunos datos para la simulación de diferentes artículos, tales como el coeficiente de fricción o la transferencia de calor.

Las tablas 1, 2, 3, 4 y 5 presentan los datos de empleados en el modelo. Tal y como se observa en la Tabla 1, se han realizado 3 ensayos modificando la velocidad de corte de 55 a 90 m/min y el avance de 0,15 a 0,25mm/v.

Referencia	Material de trabajo	Herramienta	Referencia de la herramienta	Velocidad de corte, Vc (m/min)	Profundidad de pasada, f (mm/rev)	Avance, Ap (mm)	Transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K) [3]	Coefficiente de fricción [6]
Vc_55_f_015	Ti_6Al_4V	Uncoated Carbide	TPUN 160308	55	0,15	1	1,00E+08	0,5
Vc_90_f_015	Ti_6Al_4V	Uncoated Carbide	TPUN 160308	90	0,15	1	1,00E+08	0,5
Vc_55_f_025	Ti_6Al_4V	Uncoated Carbide	TPUN 160308	55	0,25	1	1,00E+08	0,5

Tabla 1. Datos de entrada

Parámetros sobre la herramienta[4-7]	Valores y información
Radio del borde de corte, $r_n$ (mm)	0,045
Radio de la punta, $r_e$ (mm)	0,8
Angulo de desprendimiento, $\gamma_n$ (°)	6
Angulo de incidencia, $\alpha_n$ (°)	5
Angulo de corte, $k_r$ (°)	91

Tabla 2. Parámetros de la herramienta

Propiedades mecánicas y térmicas[4-7]	Valores y información
Modulo de Young, E (GPa)	600
Ratio de Poisson	0,25
Coefficiente de expansión térmica (°C <sup>-1</sup> )	Ver tabla 4
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	14933
Conductividad térmica (W/mK)	Ver tabla 4
Calor específico (J/kgK)	Ver tabla 4
Emisividad	0,45

Tabla 3. Propiedades mecánicas y térmicas de la herramienta

Temperatura (°C)	Conductividad térmica (W/mK)	Coefficiente de expansión térmica (°C <sup>-1</sup> )	Calor específico (J/kgK)
0	129,3	4,63E-06	196
200	101,7	5,01E-06	235
400	77,4	5,39E-06	256
600	65	5,77E-06	271
800	58	6,15E-06	287
1000	53,5	6,53E-06	292
1200	49,5	6,91E-06	295

Tabla 4. Datos de propiedades térmicas.

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Coefficiente de expansión térmica (°C <sup>-1</sup> )	Modulo de Young, E (MPa)	Ratio de Poisson	Conductividad térmica (W/mK)	Calor específico (J/kgK)
20	4430	8,90E-06	113390	0,21	6,6	660
100	4430	9,19E-06	113449	0,21	7,7	690
200	4430	9,57E-06	113523	0,21	9,1	730
300	4430	9,96E-06	113597	0,21	10,5	772
400	4430	1,04E-05	113671	0,21	11,8	816
500	4430	1,08E-05	113746	0,21	13,2	863
600	4430	1,12E-05	113820	0,21	14,6	913
700	4430	1,17E-05	113894	0,21	15,9	966
800	4430	1,22E-05	113968	0,21	17,3	1021
900	4430	1,27E-05	114042	0,21	18,7	1080

Tabla 5. Propiedades termo-mecánicas del Ti-6Al-4V [4-8]

El modelo constitutivo de Johnson-Cook utilizado en estas simulaciones es el siguiente [7].

$$\sigma_{eq} = \left[ A + B \varepsilon^n \left( \frac{1}{\exp(\varepsilon^a)} \right) \right] \left[ 1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right] \left[ D + (1 - D) \left[ \tanh \left( \frac{1}{(\varepsilon + p)^r} \right) \right]^s \right] \quad (1)$$

$$D = 1 - \left( \frac{T}{T_m} \right)^d \quad (2)$$

$$p = \left( \frac{T}{T_m} \right)^b \quad (3)$$

Donde  $\sigma_{eq}$  es la tensión de fluencia,  $\varepsilon$  es la deformación real,  $\dot{\varepsilon}$  es la velocidad de deformación,  $\dot{\varepsilon}_0$  es la deformación real de referencia y  $T$ ,  $T_0$  and  $T_m$  son temperaturas de trabajo, de ambiente y de fusión respectivamente. En la tabla 6 se pueden ver los valores

utilizados para cada coeficiente. En la figura 1 se muestran las condiciones de contorno que se han utilizado en las simulaciones.

Parámetros	Valores
A (MPa)	782,7
B (MPa)	498,4
C	0,028
n	0,28
m	1
T <sub>m</sub> (°C)	1604
T <sub>0</sub>	20
$\dot{\epsilon}_0$	0,00005
a	2
s	0,05
r	2
d	1
b	5

Tabla 6. Coeficiente de la ley de Johnson-Cook utilizados en las simulaciones

En las tablas 7 y 8 se pueden ver los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones. Uno de los parámetros analizados ha sido la relación de compresión de la viruta (CCR). Para poder calcular el CCR se ha seguido la ecuación 4[9].

$$CCR = \frac{t_2}{t_1} \tag{4}$$

$$t_1 = f \cdot \sin(k_r) \tag{5}$$

Donde  $t_2$  es la espesura de la viruta y  $t_1$  es el espesor de la viruta no mecanizada.

Como se puede ver en las figuras 2 y 3 las tensiones en la dirección de avance son compresivas. En cambio en la dirección estas tensiones son tractivas. Se puede decir que aumentando el avance por vuelta los valores de las tensiones aumentan. Sin embargo, aumentando la velocidad de corte estas disminuyen. En la figura 4 se puede ver el lugar de extracción de las tensiones residuales.

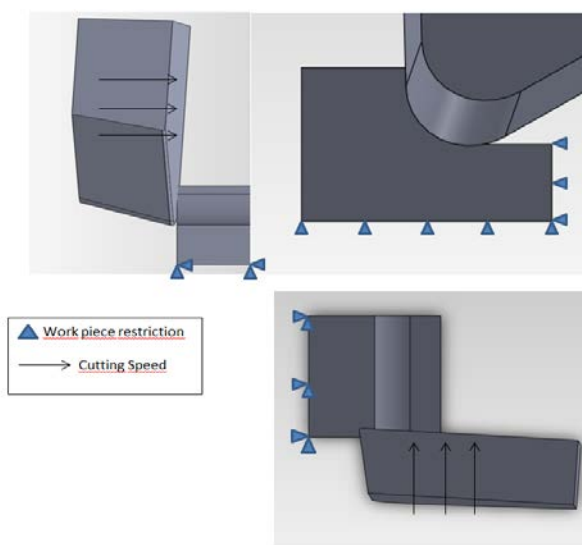


Figura 1. Condiciones de contorno mecánicas utilizadas en las simulaciones

Referencia de la simulación	t <sub>2</sub> (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	CCR
Vc_55_f_015	0,21	0,15	1,41
Vc_90_f_015	0,24	0,15	1,58
Vc_55_f_025	0,38	0,25	1,43

Tabla 7: Mediciones de la viruta

Referencia de la simulación	Fuerza de avance (N)	Fuerza de corte (N)	Fuerza Radial (N)	Temperaturas máximas (°C)
Vc_55_f_015	132	354	129	902
Vc_90_f_015	150	398	149	1240
Vc_55_f_025	179	564	183	990

Tabla 8: Valores de las fuerzas y temperaturas

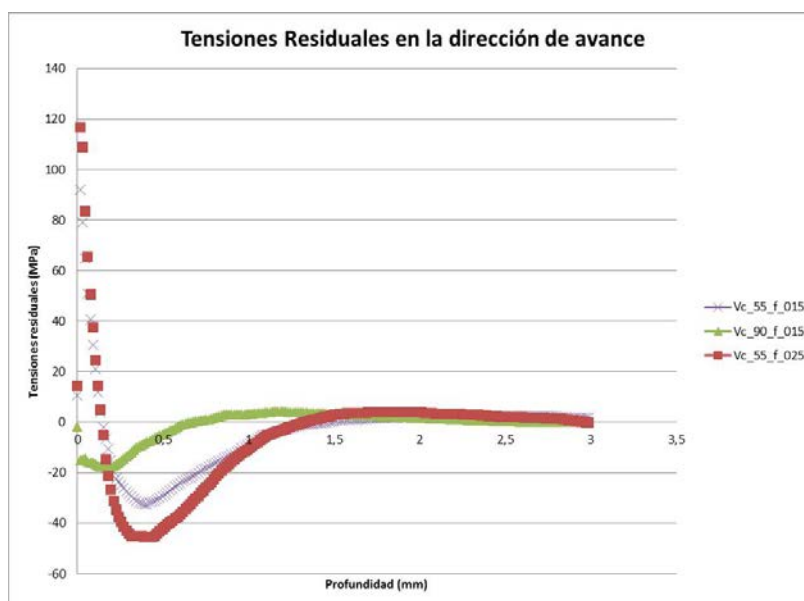


Figura 2. Tensiones residuales en la dirección de avance

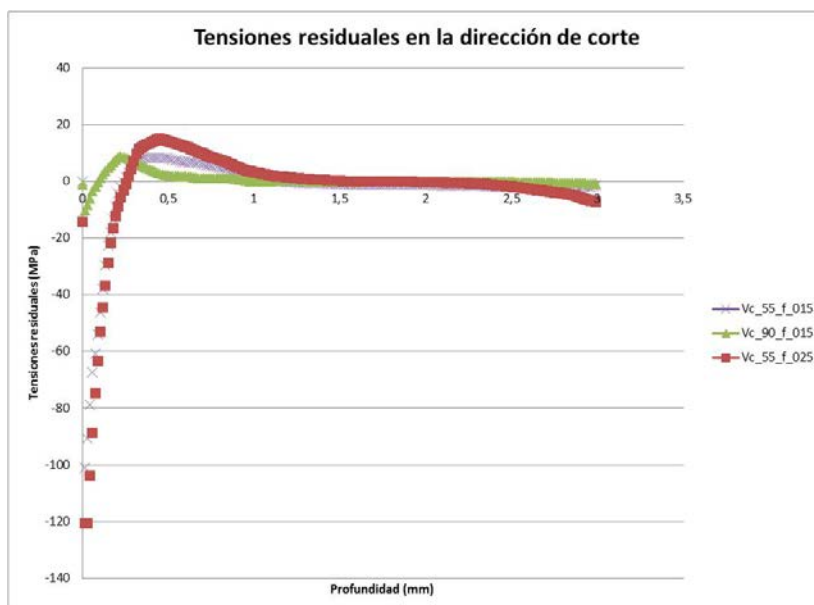


Figura 3. Tensiones residuales en la dirección de corte

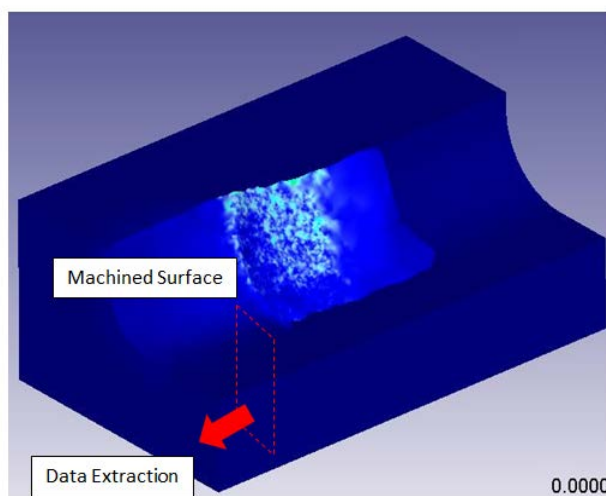


Figura 4. Lugar de extracción de las tensiones residuales

### 3. TRABAJO EXPERIMENTAL

Se realizaron seis ensayos para poder comparar los resultados con los resultados obtenidos en las simulaciones. Los parámetros utilizados están resumidos en la tabla 9.

Referencia del trabajo experimental	V <sub>c</sub> (m/mim)	f(mm)	a <sub>p</sub> (mm)
Test 1	55	0,15	1
Test 2	90	0,15	1
Test 3	55	0,25	1
Test 4	55	0,15	1
Test 5	90	0,15	1
Test 6	55	0,25	1

Tabla 9: Parámetros utilizados en el trabajo experimental

Se midió la dureza del material en la dirección de la profundidad. Como se puede ver en la figura 5, la dureza es mayor cerca de la superficie mecanizada y va disminuyendo hasta llegar a un valor constante a partir de 110 μm de 296 HV.

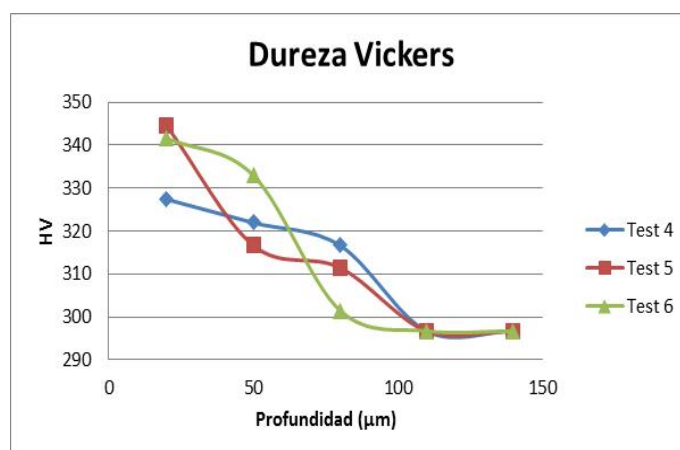


Figura 5. Dureza Vickers del Ti-6Al-4V

En la figura 6 se ve la forma y el espesor que tiene la viruta. Esa viruta corresponde a al Test 6, pero en la tabla 10 se pueden ver los espesores medios aproximados de todas las virutas y su correspondiente CCR calculado de la forma antes mencionada en la ecuación 4. Se observa claramente que la viruta es segmentada, característica habitual de esta aleación.

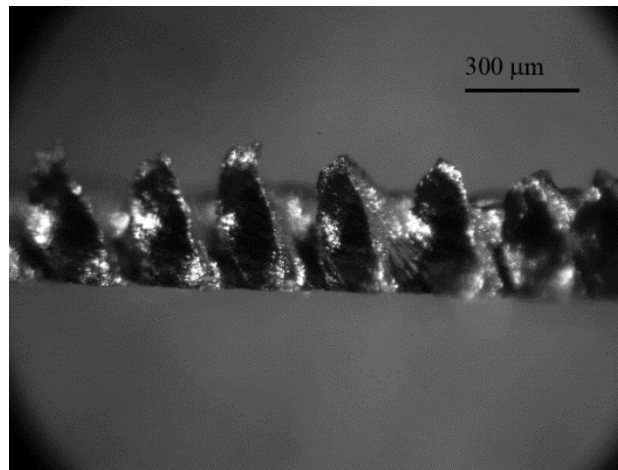


Figura 6. Forma de la viruta del test 6

Referencia del trabajo experimental	$t_2$ (mm)	$t_1$ (mm)	CCR
Test 1	0,23	0,15	1,56
Test 2	0,23	0,15	1,53
Test 3	0,33	0,25	1,33
Test 4	0,24	0,15	1,57
Test 5	0,24	0,15	1,62
Test 6	0,35	0,25	1,42

Tabla 10: Espesores de viruta obtenidos

La tabla 11 muestra los valores de las fuerzas de corte obtenidas experimentalmente. Se observa que mientras el avance tiene una gran influencia, la velocidad de corte a pensa influye.

Referencia de la simulación	Fuerza de avance (N)	Fuerza de corte (N)
Vc_55_f_015	245	360
Vc_90_f_015	235	345
Vc_55_f_025	400	570

Tabla 11: Parámetros utilizados en el trabajo experimental

Como se puede ver en las figuras 7 y 8 las tensiones en la dirección de avance y en la dirección de corte son compresivas. Se puede decir que aumentando el avance por vuelta y la velocidad de corte los valores de las tensiones aumentan.

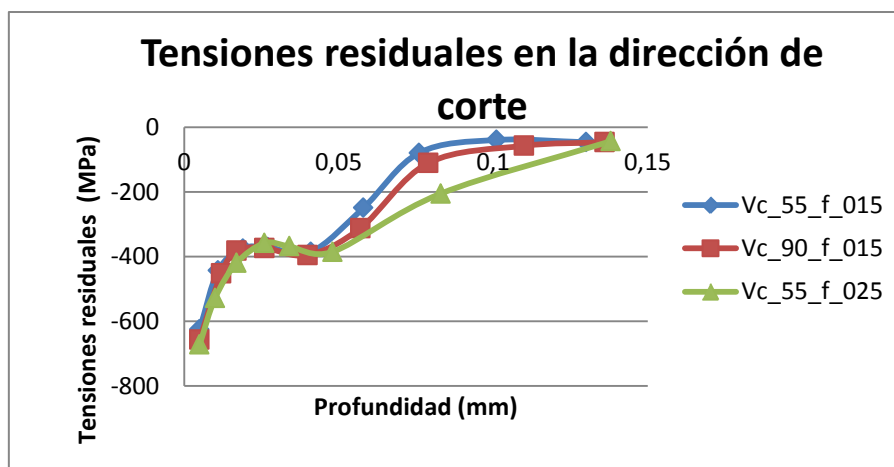


Figura 7. Tensiones residuales en la dirección de corte

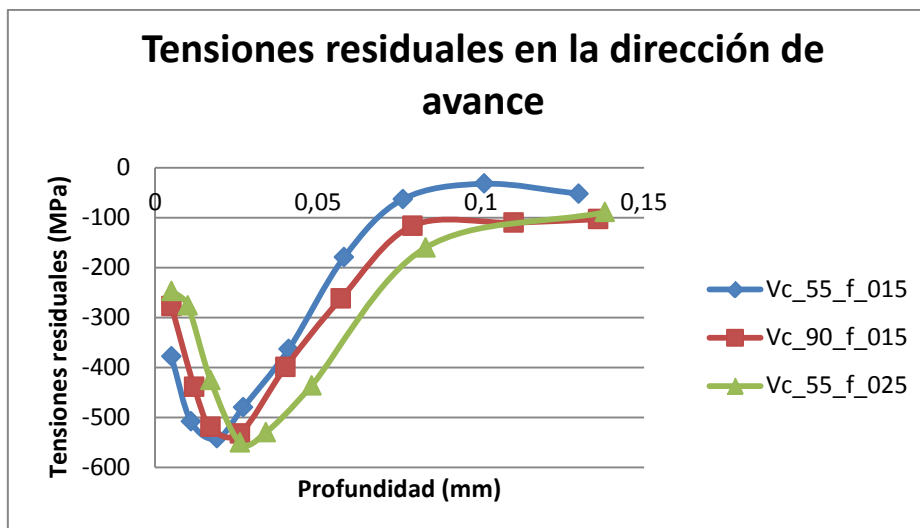


Figura 8. Tensiones residuales en la dirección de avance

#### 4. DISCUSION DE RESULTADOS

Los valores de las fuerzas de corte obtenidas son bastante semejantes, sin embargo este no es el caso en las fuerzas de avance donde se observa que las diferencias son bastante relevantes (hasta casi el 100%). Esta diferencia puede ser debida a que, en el modelo de elementos finitos, no se recoge de manera adecuada el fenómeno de rozamiento. Hay que recordar por otro lado que los datos empleados en el modelo numérico son obtenidos de la bibliografía y no de la caracterización del material mecanizado.

Respecto a la viruta, la principal diferencia es que mientras en los ensayos experimentales la viruta obtenida es segmentada, en la viruta simulada esta es continua. Ello puede ser debido a la gran sensibilidad que presenta este fenómeno con respecto a al tamaño del elemento, y que el tamaño necesario para reproducir dicho fenómeno deba ser menor.

Sin embargo los valores de espesores y CCR obtenidos son bastante semejante en ambos casos: modelización y ensayos empíricos. Las diferencias rondan el valor del 10% aproximadamente.

La dureza del material es mayor cerca de la superficie mecanizada disminuyendo según se aleja de la superficie afectada. Siendo constante después de 110  $\mu\text{m}$ . Ella da muestras de la facilidad de esta aleación al endurecimiento por deformación.

Se ha observado que en los ensayos experimentales las tensiones residuales en las direcciones de corte y de avance son compresivas. Sin embargo, en las simulaciones, las tensiones residuales en la dirección de avance son tractivas mientras que en la dirección de corte son compresivas.

La diferencia en las tensiones residuales en la dirección de avance, puede ser a causa del fenómeno de fricción, ya que no está adecuadamente definida en las simulaciones. Hay que recordar también, que los datos utilizados en las simulaciones se han extraído desde la bibliografía y no de la caracterización del material mecanizado.

#### 5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que pueden ser extraídas son las siguientes:

- Buena correlación entre resultados del modelo de elementos finitos y ensayos empíricos y no tan buenas en las fuerzas de avance.
- Buena correlación en los valores de espesores y relación de compresión de la viruta obtenida.



- Tendencia al endurecimiento por deformación de la capa de material mecanizado del al aleación Ti-6Al-4V.
- Respecto de las tensiones residuales obtenidas en la modelización mediante elementos finitos, se observa que las tensiones en la dirección de avance son compresivas y en cambio en la dirección de la velocidad de corte estas tensiones son tractivas. Se puede decir que aumentando el avance por vuelta los valores de las tensiones aumentan. Sin embargo, aumentando la velocidad de corte estas disminuyen.
- Las tensiones residuales obtenidas en los ensayos experimentales son compresivas en ambas direcciones, dirección de corte y de avance, aumentando la tensión si el avance o la velocidad de corte aumenta.

## 6. 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.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J. C. Outeiro, J. C. Pina, R. M'Saoubi, F. Pusavec, I. S. Jawahir, Analysis of residual stresses induced by dry turning o difficult to machine materials, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57 (2008), 77-80.
- [2] Özel T, Ulutan D., Prediction of machining induced residual stresses in turning of titanium and nickel based alloys with experiments and finite element simulations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.100>
- [3] Mohammad Sima, Tugrul Özel, Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50 (2010), 943-960.
- [4] Chen L., El-Wardany T.I., Harris W.C., Modelling the Effects of Flank Wear Land and Chip Formation on Residual Stresses.
- [5] SandvikCoroman, [http://coroguide.sandvik.coromant.com/products/show\\_product.asp?from\\_page=Matching&Order\\_Code=CTGPL%202525M%2016&Prod\\_Code=CTGPL2525M16](http://coroguide.sandvik.coromant.com/products/show_product.asp?from_page=Matching&Order_Code=CTGPL%202525M%2016&Prod_Code=CTGPL2525M16)
- [6] Bry Coat Advanced Metallurgical Coatings, <http://brycoat.com/pvd-tin-chart.html>
- [7] Mohammad Sima, Tugrul Özel, Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50 (2010), 943-960.
- [8] M. Sundar, A.M. Kamara, P.T. Mativenga, L.Li, Synthesis of TiAlN based coating on mild steel substrate using combined laser/sol-gel technique, *Surface & Coatings Technology*, 204 (2010), 2539-2545.
- [9] Viktor P. Astakhov, S. Shvets, The assessment of plastic deformation in metal cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, 146 (2004), 193-202.