

EVALUACION DE TENSIONES RESIDUALES EN MUESTRAS DE ALEACIONES DE ALUMINIO MECANIZADAS A ALTA VELOCIDAD

C.A. Mammana ⁽¹⁾, F. V. Díaz ⁽¹⁾⁽²⁾ y A.P.M. Guidobono ⁽³⁾

(1) Departamento de Ingeniería Electromecánica – Departamento de Ingeniería Industrial,
Facultad Regional Rafaela, Universidad Tecnológica Nacional,
Bv. Roca 989 (2300) Rafaela, Argentina

(2) Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina

(3) División Metrología Dimensional, Centro Regional Rosario,
Instituto Nacional de Tecnología Industrial,
Ocampo y Esmeralda (2000) Rosario, Argentina

E-mail (autor de contacto): felipe.diaz@fra.utn.edu.ar

RESUMEN

A partir de datos obtenidos usando un método de pares de indentas fue posible analizar diferentes estados de tensión residual, los cuales fueron generados en muestras de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6 mecanizadas a alta velocidad. Una de las ventajas de utilizar este método, el cual requiere de una máquina de medir, es que prescinde tanto del uso de equipos específicos como de operadores altamente calificados. Asimismo, con la integración de un especial dispositivo de indentación a dicha máquina es posible reducir significativamente el error absoluto de medición. Los resultados obtenidos a partir del análisis de diferentes círculos de Mohr revelan que, en los diferentes estados de tensión residual resultantes, prevalecen las componentes normales. Además, debido a la escasa participación que tienen las componentes tangenciales, los valores que alcanzan las tensiones normales no presentan variaciones significativas cuando se modifica la orientación de la dirección evaluada. Al mismo tiempo, pudo ser detectada una correlación entre los valores que alcanzan dichas tensiones normales y los inherentes a la profundidad de corte. Finalmente, fue posible formular una relación simple que vincula las sensibilidades que muestran ambas aleaciones para desarrollar tensiones residuales superficiales.

Tópico 2: Materiales Metálicos

Palabras clave: Tensiones residuales; Mecanizado de alta velocidad; Aleaciones de aluminio; Método de indentas

1. INTRODUCCIÓN

Entre los distintos procesos de fabricación, el mecanizado se destaca por el alto valor agregado que incorpora en los materiales procesados [1]. Los costos inherentes a este tipo de procesamiento se pueden reducir elevando el volumen de material removido por unidad de tiempo. En los últimos años, el desarrollo creciente tanto de máquinas como de nuevos materiales para herramientas ha permitido incrementar considerablemente los valores que alcanzan algunos de los parámetros de proceso, transformando el mecanizado convencional en mecanizado de alta velocidad (MAV) [2]. Mediante el empleo de este último es posible reducir tanto los tiempos como el número de operaciones, y a la vez, mejorar significativamente el servicio de herramientas, con el consiguiente incremento de productividad. No obstante esto, es posible que las tensiones residuales que se generan en la superficie de una componente mecanizada a alta velocidad puedan afectar la vida útil de la misma [3].

A lo largo de las últimas décadas, distintas técnicas experimentales han sido desarrolladas, y además, permanentemente optimizadas a fin de determinar las tensiones residuales que se generan en el procesamiento de diferentes tipos de materiales de ingeniería [4-6]. Recientemente, ha sido desarrollado un método basado en la modificación de distancias entre indentas, el cual posibilita determinar tensiones residuales a partir del uso de una máquina de medir universal (MMU) [7]. El cambio de distancias señalado ocurre cuando las tensiones son relajadas a través de un procedimiento de distensión [8]. Cabe señalar que, a diferencia de otros métodos, esta técnica elimina la necesidad tanto de equipos específicos como de personal exclusivo para la determinación de dichas tensiones.

En este trabajo, un método de indentas previamente optimizado se utilizó para determinar diferentes estados de tensión residual, los cuales fueron generados sobre la superficie de distintas muestras mecanizadas a alta velocidad. Los ensayos de MAV fueron realizados usando probetas de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6. Dichos ensayos consistieron en operaciones de fresado frontal, las cuales fueron llevadas a cabo en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente. Cabe notar que este tipo de fresado posibilita distinguir, en la superficie generada, dos zonas adyacentes denominadas de corte ascendente y descendente. La profundidad de corte fue variada con el fin de evaluar la modificación de los tensores de tensiones en dichas zonas. A fin de optimizar el análisis, diferentes círculos de Mohr [9] asociados a estos tensores fueron evaluados. Finalmente, a partir de esta evaluación fue posible identificar una relación inherente a las sensibilidades de ambas aleaciones para desarrollar tensiones residuales.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El método de medición previamente mencionado se detalla en la Ref. 7. Brevemente, este consiste en realizar una distribución de indentas sobre la superficie a evaluar, para luego medir, antes y después de un tratamiento térmico de distensión, las coordenadas de dichas indentas usando una MMU. En este trabajo, la distribución de indentas es introducida usando un dispositivo mecánico que se integra a la mencionada máquina de medir, lo cual permite conseguir mayor precisión tanto en la generación como en la posterior localización óptica de dicha distribución. Es importante notar que mediante la utilización del mencionado dispositivo es posible introducir indentas longitudinales, a partir de las cuales se puede reducir la incertidumbre de reposicionamiento de las muestras a posteriori del tratamiento de distensión [10].

El trabajo experimental se llevó a cabo a partir de dos productos laminados: las aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6. Estas aleaciones pueden ser consideradas de características mecánicas media y alta, respectivamente. La composición química de las mismas, junto a sus características mecánicas, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de las aleaciones investigadas

Aleación	Composición química (% peso)								Propiedades Mecánicas			
	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Res. Tracción	Lim. Elástico	Elongación	Dureza
									σ_u (MPa)	$\sigma_{y0.2}$ (MPa)	A (%)	HV0.5
AA6082-T6	Base	0.2	0.9	0.15	0.5	0.9	0.22	0.6	340	310	11	108
AA7075-T6	Base	5.6	2.52	1.72	0.32	0.2	0.17	0.16	570	505	11	86

Las dimensiones de las muestras evaluadas se pueden ver en la Fig. 1(a). Previamente a los ensayos de mecanizado, las mismas fueron tratadas térmicamente a fin de eliminar las tensiones residuales generadas en la operación de laminado. La temperatura y tiempo correspondientes a dicho tratamiento fueron de 573 K y 80 minutos, respectivamente. Para los mencionados ensayos se usó una fresa frontal de 63 mm de diámetro. Los insertos (Palbit SEHT 1204 AFFN-AL SM10) que se

incorporaron a dicha herramienta fueron de carburo de tungsteno. En la Tabla 2 se detalla tanto la geometría de estos insertos como los parámetros de MAV seleccionados para este trabajo. Los ensayos fueron realizados en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente (Clever CMM-100). Una vista superior de la posición relativa de la muestra ensayada con respecto a la herramienta de corte es mostrada en la Fig. 1(b).

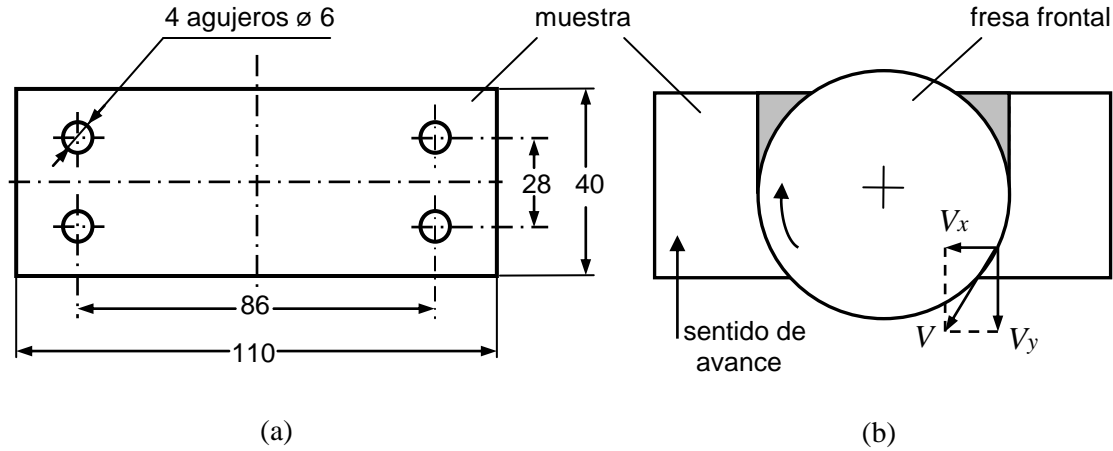


Figura 1. (a) Muestra. Las medidas están en mm y el espesor es 4 mm. (b) Vista superior del sistema herramienta-muestra.

Tabla 2. Geometría de la herramienta y parámetros de corte

Ángulo de desprendimiento γ (°)	Ángulo de incidencia α (°)	Ángulo de entrada χ (°)	Velocidad de corte V (m/min)	Avance f (mm/rev)	Profundidad de corte d (mm)
45	7	45	1000	0.2	1.00 – 1.25

A partir del procedimiento de medición llevado a cabo en este trabajo es posible evaluar el estado de tensión residual en cualquier punto de la superficie generada. Tomando en cuenta un estudio previo [10], dos puntos significativos fueron seleccionados. La Fig. 2 muestra estos puntos (A y B), los cuales se ubican en los baricentros de las zonas de corte ascendente y descendente. Esta figura también muestra la distribución de indentas introducida (cada vértice de dos cuadrados adyacentes es ocupado por dos indentas ortogonales entre sí). Las coordenadas de estas indentas fueron medidas (antes y después del tratamiento de distensión) dentro de un rango de temperaturas de 20 ± 0.2 °C, usando una máquina de medir GSIP MU-314. Finalmente, dicho tratamiento de distensión también se llevó a cabo por el término de 80 minutos, a una temperatura de 573 K.

3. DETERMINACION DE DEFORMACIONES Y TENSIONES RESIDUALES

Para cada uno de los baricentros (Fig. 2), es posible determinar las componentes normales de la deformación residual en tres direcciones. Dos de estas (inherentes a ε_x y ε_y) son perpendiculares entre sí y paralelas a los lados de los mencionados cuadrados. La restante (inherente a ε_{45}) corresponde a la bisectriz de las anteriores. Dichas componentes normales pueden ser expresadas como

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{l_x - l'_x}{l'_x} \\ \varepsilon_y &= \frac{l_y - l'_y}{l'_y} \\ \varepsilon_{45} &= \frac{l_{45} - l'_{45}}{l'_{45}}\end{aligned}\tag{1}$$

donde l_x y l'_x son los valores medios de los lados horizontales del cuadrado y, l_y y l'_y los valores medios de los lados verticales del mismo, en ambos casos, antes y después de la distensión, respectivamente. A su vez, l_{45} y l'_{45} corresponden a la diagonal de dicho cuadrado, también antes y después de la distensión, respectivamente. Luego, la componente tangencial de la deformación residual puede ser obtenida a partir de estas componentes normales usando [9]

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_{45} - \varepsilon_x - \varepsilon_y\tag{2}$$

Se debe notar que los valores que alcanzan las componentes de la deformación residual se modificaran en la medida que se altere la orientación de sus direcciones. A partir de esto, es posible expresar las componentes asociadas a una dirección arbitraria θ , en función de las componentes inherentes a los ejes ortogonales de referencia x e y [9]

$$\begin{aligned}\varepsilon_{x'} &= \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \cdot \sin 2\theta \\ \gamma_{x'y'} &= (\varepsilon_y - \varepsilon_x) \cdot \sin 2\theta + \gamma_{xy} \cdot \cos 2\theta\end{aligned}\tag{3}$$

donde θ es el ángulo que forma la mencionada dirección arbitraria y el eje de referencia x (ver Fig. 2).

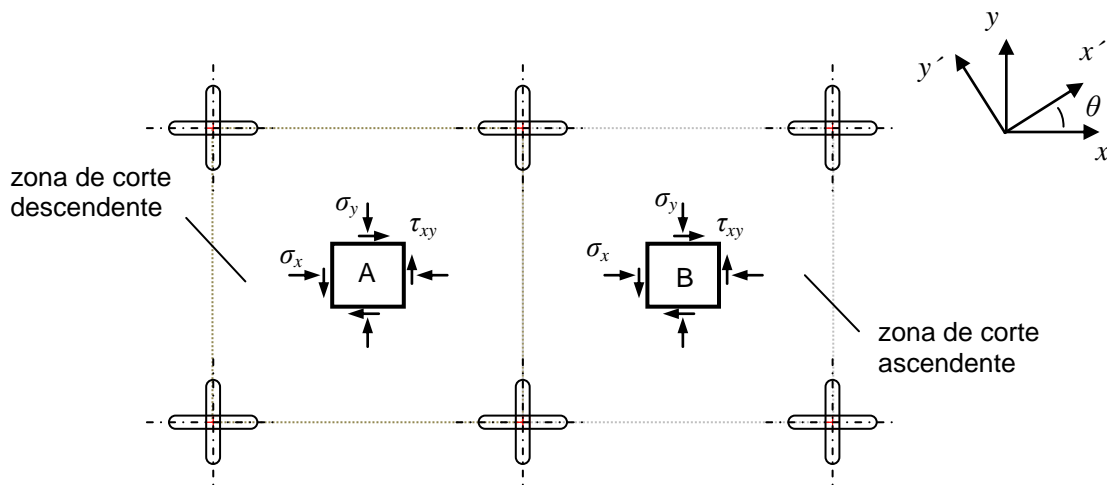


Figura 2. Baricentros correspondientes a las zonas de corte ascendente y descendente.

Luego, para la misma dirección arbitraria θ y asumiendo que la superficie evaluada se halla bajo condiciones de tensión plana [9], las componentes normal y tangencial de la tensión residual para el caso de un material elástico lineal, homogéneo e isótropo pueden ser expresadas como

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta$$
$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (4)$$

donde σ_x , σ_y y τ_{xy} son las componentes de la tensión residual correspondientes a los ejes ortogonales de referencia.

Es importante notar que las componentes de la Ec. (4), las cuales varían en forma continua conforme lo hace el ángulo θ , pueden ser representadas en forma gráfica por medio de un trazado conocido como círculo de Mohr [9]. Esta representación es de gran utilidad ya que permite visualizar las relaciones entre las componentes normales y tangenciales que corresponden a las diferentes orientaciones. Además, dicha representación también posibilita visualizar, en forma muy clara, los intervalos de variación de las mencionadas componentes.

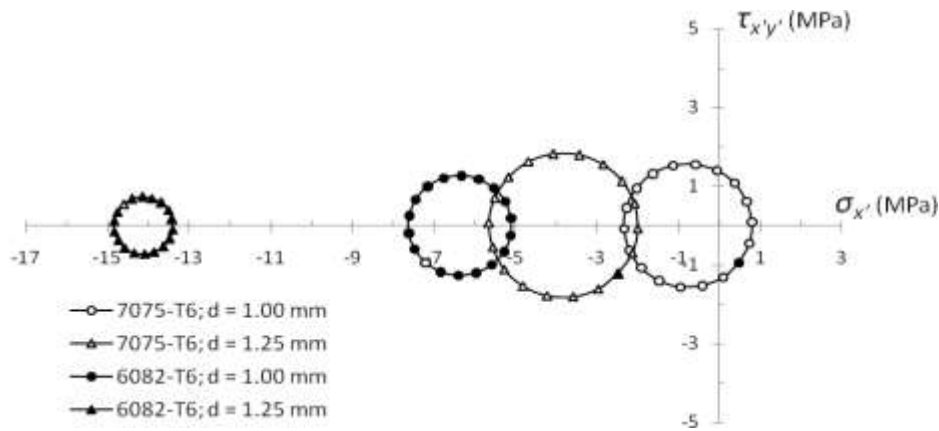
Por otra parte, los errores inherentes a las componentes de la deformación y tensión residual fueron obtenidos a partir del error absoluto correspondiente a la distancia entre indentas. En primer lugar, este último, evaluado tomando en cuenta los errores de medición tanto nominales como estadísticos, alcanzó un entorno de $\pm 0.2 \mu\text{m}$ para una distancia nominal de 28 mm [10]. Luego, usando la ecuación atinente al error absoluto probable [11], los entornos obtenidos para las mencionadas componentes de la deformación y tensión residual fueron de $\pm 0.001 \%$ y $\pm 0.9 \text{ MPa}$, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

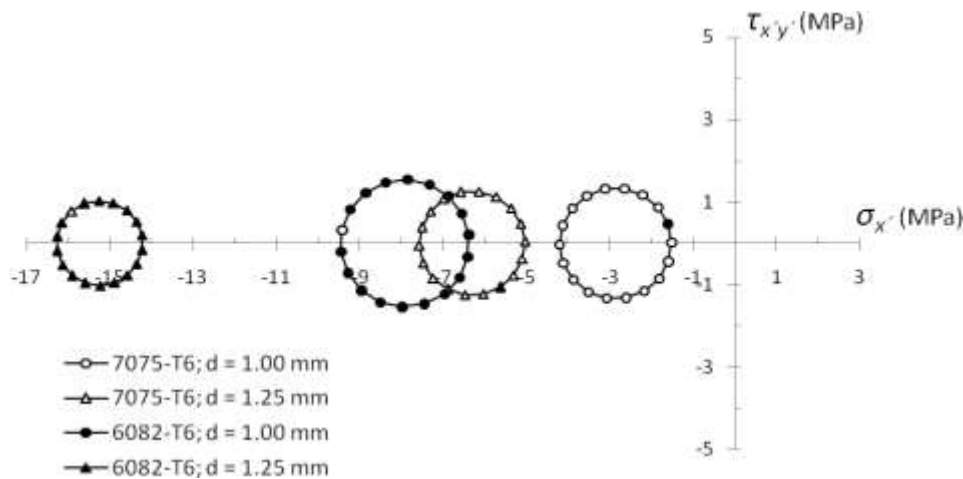
Para cada punto significativo de las superficies generadas, es posible evaluar diferentes círculos de Mohr a fin de comprender claramente los diferentes estados de tensión residual introducidos por MAV. Como fuera mencionado previamente, dos puntos representativos que se ubican en los baricentros de las zonas de corte ascendente y descendente fueron seleccionados. Los círculos de Mohr que corresponden a estos puntos son mostrados en la Fig. 3. Cabe notar que las coordenadas ortogonales de cada uno de los puntos de cada círculo representan los valores de las componentes de la tensión residual correspondientes a un elemento infinitesimal cuyos ejes se inclinan un ángulo θ con respecto a los ejes de referencia. Además, el punto diferente de cada círculo corresponde a la dirección de referencia ($\theta = 0$ en Fig. 2).

Los círculos de Mohr correspondientes al baricentro de la zona de corte descendente (punto A) se muestran en la Fig. 3(a). Es importante notar que, en esta zona, el sentido de la componente V_y de la velocidad de corte coincide con el de la velocidad de avance. Al comparar los círculos se observa que las tensiones normales obtenidas para la aleación 6082-T6 son, en valor absoluto, mayores que las alcanzadas para la aleación 7075-T6 cuando se mantienen constantes los parámetros de corte. Por otra parte, si se comparan los resultados obtenidos para cada aleación, se observa una relación directa entre la profundidad de corte y el nivel compresivo alcanzado, siendo esta relación más pronunciada en el caso de la aleación 6082-T6. En la Fig. 3(b) se representan las componentes determinadas en el punto B, ubicado en el baricentro de la zona de corte ascendente, donde el sentido de la componente V_y de la velocidad de corte es opuesto al de la velocidad de avance. Si se hacen las mismas comparaciones que en el caso anterior, los resultados son idénticos ya que la

disposición de los círculos es semejante en ambos casos. Sin embargo, si se comparan las Figs. 3 (a) y (b) entre sí, se observará que cada círculo de la primera está ligeramente desplazado hacia la derecha con respecto a su homólogo de la segunda, de lo cual se desprende que las tensiones normales son más compresivas en la zona correspondiente a corte ascendente. Este comportamiento estaría vinculado con la notoria influencia que tiene la orientación relativa entre la componente V_y y la velocidad de avance sobre la generación de deformación plástica local [10].



(a)



(b)

Figura 3. Círculos de Mohr correspondientes a los baricentros de las zonas de corte (a) descendente (Punto A) y (b) ascendente (Punto B).

La Fig. 4 muestra la componente σ_p de la tensión residual correspondiente a la dirección (principal) para la cual dicha componente es máxima en valor absoluto. Esta componente se representa en función de la profundidad de corte, para ambas aleaciones ensayadas y en cada uno de los baricentros evaluados (Puntos A y B). Cabe destacar que las direcciones principales son aquellas, ortogonales entre sí, donde las componentes normales alcanzan sus valores máximo y mínimo [9].

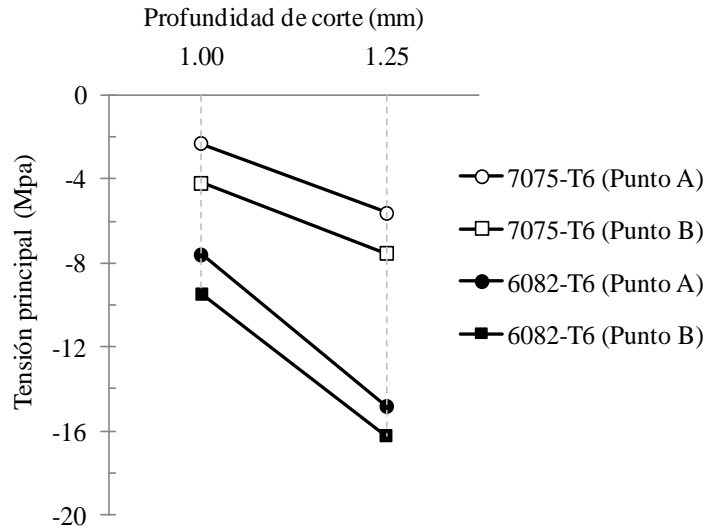


Figura 4. Tensión principal en función de la profundidad de corte.

Como se puede observar, las diferentes pendientes corroboran que cada aleación tiene su propio modo de cambio cuando se incrementa la profundidad de corte. Para cada aleación, el incremento de tensión no depende del baricentro evaluado. Además, las diferencias entre los valores correspondientes a estos baricentros serían independientes tanto del tipo de aleación como del valor de la profundidad de corte. La Tabla 3 muestra los incrementos que se observan en la tensión principal al aumentar la profundidad de corte. Es importante notar que todos los incrementos son negativos. Además, los mismos muestran valores similares para ambos baricentros analizados. A partir de esta Tabla, es posible formular una relación entre los incrementos correspondientes a ambas aleaciones

$$\frac{\Delta\sigma_{p_{6082}}^d}{\Delta\sigma_{p_{7075}}^d} \approx 2$$

la cual cuantificaría la diferencia de sensibilidad al cambio en la profundidad de corte cuando los valores de la tensión principal son evaluados. Además esta relación es similar a [10]

$$\frac{\Delta\sigma_{x_{6082}}^d}{\Delta\sigma_{x_{7075}}^d} \approx 2$$

la cual fuera obtenida, en un estudio previo, para la componente normal a la dirección de avance, al analizar el baricentro de la superficie entera que ha sido generada. Es importante destacar que, en el caso actual, la relación depende de los valores del tensor de tensiones ya que las direcciones inherentes no son las mismas para ambas aleaciones. Finalmente, la diferencia de sensibilidad encontrada entre ambas aleaciones podría ser debida a las diferentes fracciones de energía calórica desde la zona primaria de corte [12] hacia la superficie maquinada, la cual es siempre más alta para el caso de la aleación 6082-T6 debido, principalmente, a su mayor conductividad térmica.

Tabla 3. Incrementos de la tensión principal

Aleación	$\Delta\sigma_p^d$ (MPa)	
	Punto A	Punto B
6082-T6	- 7.23	- 6.82
7075-T6	- 3.32	- 3.36

5. CONCLUSIONES

El método de indentas utilizado en este trabajo permitió llevar a cabo una evaluación exhaustiva de las componentes de la tensión residual en puntos representativos de las diferentes superficies mecanizadas. Las tensiones tangenciales obtenidas se hallaron en un entorno muy reducido alrededor de cero. En cuanto a las tensiones normales, las mismas mostraron ser algo mayores que las tangenciales, y además, de carácter compresivo. A partir del análisis de diferentes círculos de Mohr fue posible detectar que las tensiones normales son ligeramente más altas en la zona de corte ascendente, lo cual respondería a la mayor deformación plástica local que se genera cuando el sentido de la componente V_y de la velocidad de corte es opuesto al de la velocidad de avance. A pesar de que esta diferencia entre tensiones normales es muy pequeña, la sensibilidad del método de medición propuesto en este trabajo permitió detectarla. El análisis de los tensores inherentes a ambas zonas de corte hizo posible formular una relación simple vinculada a las sensibilidades que muestran ambas aleaciones para desarrollar tensiones residuales. Finalmente, la aleación 6082 – T6 mostró ser más susceptible al cambio en la profundidad de corte, lo cual estaría vinculado a un mayor flujo calórico desde la zona de corte primaria hacia la superficie generada.

REFERENCIAS

1. E.M. Trent, “Metal Cutting”; 1991, Butterworth/Heinemann, London.
2. H. Schulz, “High Speed Machining”; 1996, Carl Hanser, Munich.
3. A.L. Mantle and D.K. Aspinwall, “Surface integrity of a high speed milled gamma titanium aluminide”, *J. Mater. Process. Technol.* 118 (2001), p. 143-150.
4. J. Lu (Ed.) “Handbook of measurement of residual stresses”; 1996, Fairmont Press Inc., Lilburn, Georgia.
5. R.E. Rowlands, “Residual stresses”. In: *Handbook on Experimental Mechanics* (Ed. A.S. Kobayashi); 1987, pp. 768-813, Prentice-Hall, New Jersey.
6. P.J. Withers and H.K. Bhadeshia HK, “Residual stress. Part 1 – Measurement techniques”. *Mater. Sci. Technol.* 17 (2001), p. 355-365.
7. J.E. Wyatt and J.T. Berry, “A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes”; *J. Mater. Process. Technol.* 171 (2006), p. 132-140.
8. F.V. Díaz, R.E. Bolmaro, E.F. Girini y H. Bianchini, “Determinación de tensiones residuales inducidas por maquinado”; *Anales SAM/CONAMET*, 2007, P. 1581-1586.
9. J.M. Gere, “Mechanics of Materials”, 5th edn; 2001, Brooks/Cole, Pacific Grove, CA.
10. F.V. Díaz, R.E. Bolmaro, A.P.M. Guidobono and E.F. Girini “Determination of residual stresses in high speed milled aluminium alloys using a method of indent pairs”, *Exp. Mech.* 50 (2010), p. 205-215.
11. P.R. Bevington and D.K. Robinson, “Data reduction and error analysis for the physical sciences”; 2002, McGraw-Hill, New York.
12. T. Özel and E. Zeren, “Determination of flow material stress and friction for FEA of machining using orthogonal cutting tests”, *J. Mater. Proc. Tech.* 153 (2004), p. 1019-1025.