

DEFORMACIONES Y TENSIONES RESIDUALES INDUCIDAS POR FRESADO DE ALTA VELOCIDAD

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

(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)

(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

Un método basado en la medición de distancias entre indentas es usado para determinar deformaciones y tensiones residuales en muestras de aleación de aluminio AA 6082-T6 fresadas a alta velocidad. Este método incorpora un dispositivo de indentación que posibilita reducir el error absoluto de medición. El presente método ofrece la gran ventaja de evitar el uso de equipos específicos, los cuales no solo son muy costosos sino que requieren la presencia de operadores altamente calificados. En este trabajo, los parámetros de alta velocidad fueron seleccionados a fin de introducir deformaciones y tensiones residuales reducidas. Cabe destacar que las operaciones de fresado de alta velocidad presentan una serie de desafíos tecnológicos no siempre bien resueltos y que, en la literatura, hay pocos trabajos que reportan las distribuciones de deformaciones y tensiones residuales que se generan. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que a partir de los parámetros seleccionados no solo se generan distribuciones de deformaciones y tensiones residuales compresivas de niveles reducidos sino que, además, las formas que adoptan dichas distribuciones permanecen inalterables. Por otra parte, estas distribuciones revelan un grado de asimetría similar cuando se comparan las zonas correspondientes a corte ascendente con aquellas generadas por corte descendente.

Palabras clave: Tensiones residuales; Fresado de alta velocidad; Aleación de aluminio; Método de indentas.

1. INTRODUCCION

Las máquinas de medir universales (MMU) son utilizadas en la industria para realizar mediciones dimensionales de alta precisión en diversas componentes de máquinas y estructuras [1]. En los últimos años, estas máquinas se han transformado en una parte importante de los sistemas de calidad industrial, generando, a la vez, bajos costos de inspección y notables incrementos de productividad. Este tipo de máquinas suelen ser muy requeridas debido a que son rápidas de operar, versátiles y flexibles, pudiendo cumplir tanto la función tradicional de rechazar componentes que se hallan fuera de las especificaciones de diseño, como también la de suministrar información para optimizar los procesos de fabricación involucrados [2].

Una función para la cual estas máquinas no fueron diseñadas es aquella atinente a la determinación de tensiones residuales. Sin embargo, muy recientemente, ha sido desarrollado un método basado en la modificación de la distancia entre pares de indentas para determinar tensiones residuales a partir del uso de una MMU [3]. El cambio de la mencionada distancia ocurre cuando las tensiones son relajadas a través de un procedimiento de distensión [4]. Cabe destacar que dicho método ofrece la gran ventaja de evitar la utilización de equipos y personal exclusivo para la determinación de las mencionadas tensiones.

Por otra parte, el maquinado de componentes mecánicas es uno de los procesos de fabricación más importantes debido a que incorpora, en los materiales que transforma, un alto valor agregado. Los costos que genera este proceso de fabricación pueden ser reducidos a través del incremento de los valores que alcanzan algunos de los parámetros de proceso tales como el avance y la velocidad de corte [5]. Si el incremento mencionado es significativo, el maquinado convencional se transforma en maquinado de alta velocidad (MAV) [6]. Esta clase de maquinado ofrece algunas ventajas, como por ejemplo: alta productividad, reducción del número de operaciones e incremento en el tiempo de servicio de las herramientas usadas.

Además el MAV genera superficies de alta calidad desde el punto de vista de la geometría y la rugosidad. Sin embargo, las componentes que se maquinan con parámetros de alta velocidad pueden fallar en forma prematura debido a las tensiones residuales que se desarrollan en las superficies de las mismas [7].

El propósito de este trabajo es usar un método de indentas a fin de determinar y evaluar las distribuciones de deformaciones y tensiones residuales generadas, en muestras de aleación de aluminio AA 6082-T6, a partir del uso de parámetros de corte de alta velocidad. El presente trabajo incluye un análisis de la propagación de los errores inherentes a la medición de las coordenadas de las mencionadas indentas, el cual permitió corroborar que las deformaciones y tensiones residuales fueron obtenidas a partir de entornos de errores muy reducidos. El maquinado de las muestras consistió en operaciones de fresado frontal, las cuales fueron llevadas a cabo en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente. Las distribuciones de las deformaciones y tensiones generadas por dichas operaciones fueron comparadas con las distribuciones atinentes a las componentes ortogonales de la fuerza tangencial de corte. Finalmente, a partir de las pendientes que alcanzaron las mencionadas distribuciones, fue posible el análisis de las zonas maquinadas que correspondieron a corte ascendente y corte descendente.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El método de medición que ha sido mencionado más arriba y que fuera recientemente desarrollado se presenta, en líneas generales, en la Ref. 3. Brevemente, este consiste en realizar una distribución de indentas sobre la superficie a evaluar usando un indentador Vickers, para medir a continuación, antes y después de un tratamiento de distensión, las coordenadas de dichas indentas usando una MMU. En el presente trabajo, la distribución de indentas es introducida usando un dispositivo indentador que se monta especialmente en la MMU, lo cual permite mayor precisión tanto en la generación como en la posterior localización óptica de dicha distribución. Usando el mencionado dispositivo indentador es posible introducir indentas longitudinales, a partir de las cuales es posible reducir la incertidumbre de reposicionamiento de las muestras a posteriori del tratamiento de distensión. La Fig. 1 muestra la geometría correspondiente a una indenta longitudinal.

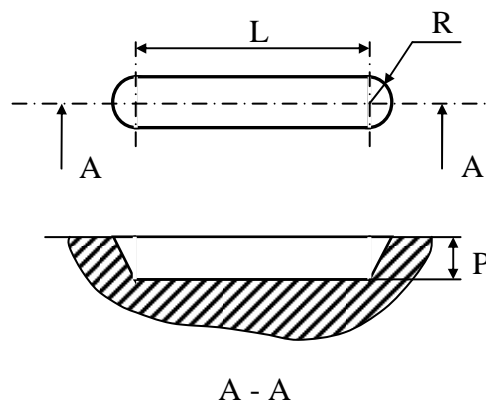


Figura 1. Geometría de una indenta longitudinal: (L) longitud, (R) radio de extremo, (P) profundidad.

Las dimensiones de las muestras maquinadas con parámetros de MAV fueron de $110 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3$. El material evaluado en este trabajo corresponde a una aleación de aluminio AA 6082-T6. En la Tabla 1 se detallan los valores correspondientes a su composición química y a sus propiedades mecánicas. Previamente a los ensayos de maquinado, las muestras fueron tratadas térmicamente a fin de eliminar las tensiones residuales generadas en el proceso de laminación del mencionado material. La temperatura y tiempo correspondientes a la operación de distensión fueron 573 K y 80 minutos, respectivamente. Para los ensayos de maquinado 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 dichos insertos como los parámetros de MAV seleccionados para este trabajo. Los ensayos de maquinado 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 se puede ver en la Fig. 2(a). Además, en la Fig. 2(b) se muestra un esquema de la superficie que ha sido maquinada, en la cual se diferencia la zona de corte ascendente (V_y y f tienen sentidos opuestos) de aquella de corte descendente (V_y y f tienen el mismo sentido).

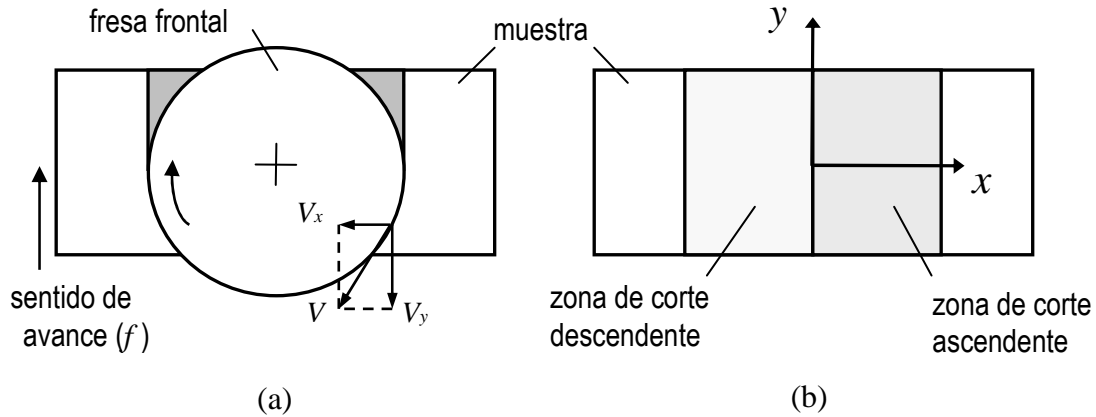
Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas de la aleación AA 6082-T6

Composición química (% peso)								Res. tracción	Lim. elástico	Elongación	Dureza
Al	Mg	Si	Mn	Fe	Cr	Zn	Cu	σ_u (MPa)	$\sigma_{y0.2}$ (MPa)	A (%)	HV0.5
Base	0.91	0.87	0.58	0.5	0.22	0.2	0.16	340	310	11	108

Tabla 2. Geometría de la herramienta y parámetros de corte

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

Sobre cada una de las superficies maquinadas se realizó una distribución de indentas que permitió determinar las deformaciones y tensiones residuales en varios puntos pertenecientes a ambos ejes de simetría de las mismas ($x = 0$ e $y = 0$ en la Fig. 2(b)). Las coordenadas de dichas indentas fueron medidas, antes y después del tratamiento de distensión, usando una máquina de medir GSIP MU-314, dentro de un rango de temperaturas de 20 ± 0.2 °C. Finalmente, dicho tratamiento de distensión, realizado a fin de liberar las tensiones residuales generadas por el maquinado, se llevó a cabo por el término de 80 minutos, a una temperatura de 573 K.

**Figura 2.** (a) Vista superior del sistema herramienta-muestra. (b) Superficie maquinada.

3. DETERMINACION DE ERRORES

A partir de una distribución de indentas longitudinales, como aquella que muestra la Fig. 3, es posible obtener las deformaciones residuales

$$\varepsilon_x = \frac{X_a}{X_d} - 1$$

$$\varepsilon_y = \frac{Y_a}{Y_d} - 1 \quad (1)$$

donde X_a y X_d son las distancias entre las indentas A y B, antes y después del procedimiento de distensión, respectivamente. A su vez, Y_a e Y_d corresponden a las distancias entre las indentas C y D, antes y después del mismo procedimiento, respectivamente.

El error nominal inherente al procedimiento de medición de las mencionadas distancias, antes y después del tratamiento de distensión, fue evaluado a partir de los errores de apreciación y exactitud correspondientes a la mencionada máquina de medir, y también, a partir del error de interacción, que en nuestro caso correspondió a la incertidumbre de reposicionamiento de la muestra maquinada. Por otra parte, los errores de carácter estadístico, correspondientes a los estados anterior y posterior al procedimiento de distensión, también fueron evaluados. En nuestro caso, estos últimos fueron obtenidos a partir de diez lecturas para cada

una de coordenadas. Finalmente, tomando en cuenta los mencionados errores (nominal y estadístico), el error absoluto inherente a dichas distancias alcanzó un entorno de $\pm 0.2 \mu\text{m}$ para una distancia nominal de 28 mm.

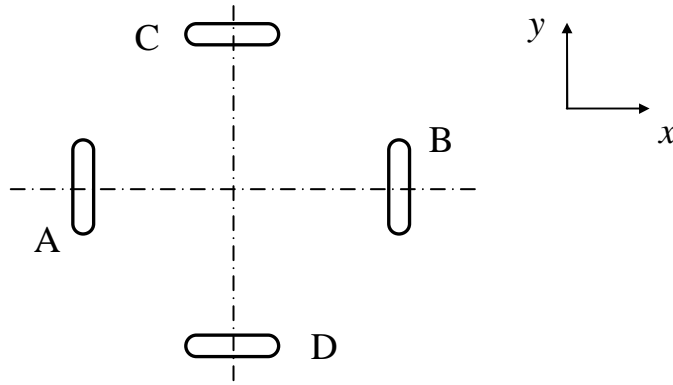


Figura 3. Distribución de indentas longitudinales para medición ortogonal.

Luego, a partir de la ecuación atinente al error absoluto probable [8], fue posible obtener las expresiones que corresponden a los errores de las deformaciones residuales

$$\Delta \varepsilon_x = \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon_x}{dX_a}\right)^2 \cdot \Delta X_a^2 + \left(\frac{d\varepsilon_x}{dX_d}\right)^2 \cdot \Delta X_d^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta X_a}{X_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X_d}{X_d^2}\right)^2} \cdot X_a^2$$

$$\Delta \varepsilon_y = \sqrt{\left(\frac{d\varepsilon_y}{dY_a}\right)^2 \cdot \Delta Y_a^2 + \left(\frac{d\varepsilon_y}{dY_d}\right)^2 \cdot \Delta Y_d^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta Y_a}{Y_d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_d}{Y_d^2}\right)^2} \cdot Y_a^2 \quad (2)$$

donde ΔX_a , ΔX_d , ΔY_a y ΔY_d son los errores absolutos obtenidos para las distancias entre indentas X_a , X_d , Y_a e Y_d , respectivamente.

Por otra parte, si se considera a la superficie evaluada bajo un estado plano de tensiones [9], las componentes ortogonales de la tensión residual para un material elástico lineal, homogéneo e isotrópico pueden ser expresadas como

$$\sigma_x = k_1 \cdot \varepsilon_x + k_2 \cdot \varepsilon_y$$

$$\sigma_y = k_1 \cdot \varepsilon_y + k_2 \cdot \varepsilon_x \quad (3)$$

donde $k_1 = E / (1 - \nu^2)$, $k_2 = \nu \cdot k_1$, E es el módulo de elasticidad longitudinal y ν es la razón de Poisson. Luego, los errores absolutos inherentes a estas componentes podrán ser obtenidos a partir de los errores que corresponden a las deformaciones residuales [8]

$$\Delta \sigma_x = \sqrt{\left(\frac{d\sigma_x}{d\varepsilon_x}\right)^2 \cdot \Delta \varepsilon_x^2 + \left(\frac{d\sigma_x}{d\varepsilon_y}\right)^2 \cdot \Delta \varepsilon_y^2} = \sqrt{k_1^2 \cdot \Delta \varepsilon_x^2 + k_2^2 \cdot \Delta \varepsilon_y^2}$$

$$\Delta \sigma_y = \sqrt{\left(\frac{d\sigma_y}{d\varepsilon_x}\right)^2 \cdot \Delta \varepsilon_x^2 + \left(\frac{d\sigma_y}{d\varepsilon_y}\right)^2 \cdot \Delta \varepsilon_y^2} = \sqrt{k_2^2 \cdot \Delta \varepsilon_x^2 + k_1^2 \cdot \Delta \varepsilon_y^2} \quad (4)$$

Finalmente, a partir de las Ecs. (2) y (4), los errores absolutos inherentes a las deformaciones y tensiones residuales que se obtuvieron fueron de $\pm 0.001 \%$ y $\pm 0.9 \text{ MPa}$, respectivamente.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

La componente ε_x de la deformación residual fue evaluada para diferentes puntos pertenecientes al eje de simetría $x = 0$. Cabe notar que dicha componente de la deformación residual es perpendicular a la dirección del movimiento de avance. La Fig. 4(a) muestra las distribuciones de la mencionada componente para diferentes profundidades de corte. El rasgo saliente es que la modificación de la profundidad de corte no introduce cambios en cuanto a la forma en la que se distribuye dicha componente. Además, se produce un descenso de nivel cuando dicha profundidad aumenta. La Fig. 4(b) muestra la componente σ_x de la tensión residual, la cual es evaluada a lo largo del mismo eje de simetría $x = 0$. Estas distribuciones tienen una gran similitud con aquellas de la Fig. 4(a): muestran la misma forma y el nivel decrece con el aumento de la profundidad de corte.

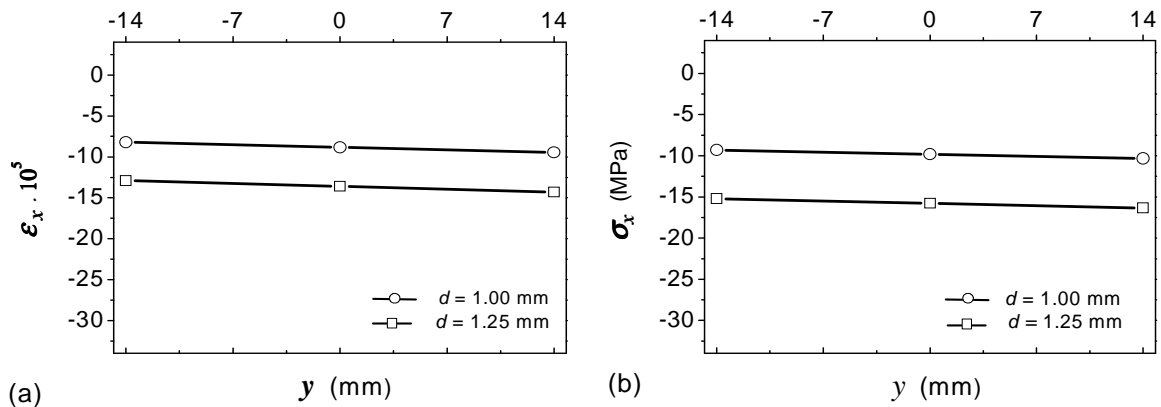


Figura 4. Distribuciones de las componentes (a) ε_x de la deformación y (b) σ_x de la tensión residual, a lo largo del eje $x = 0$ ($V = 1000$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev).

La otra componente de la deformación residual ε_y , la cual es paralela a la dirección de avance, fue evaluada a lo largo del eje de simetría $y = 0$. La Fig. 5(a) muestra las distribuciones correspondientes a esta componente. Para este caso, dichas distribuciones tienen forma de V, con el valor mínimo localizado en el centro del eje. Como era esperado, el aumento en la profundidad de corte generó deformaciones más compresivas. Por otra parte, la Fig. 5(b) muestra la componente de la tensión residual σ_y a lo largo del mismo eje. Para este caso, también, ambas distribuciones no solo tienen la misma forma, sino que además muestran una gran similitud con aquellas distribuciones que corresponden a la componente ε_y .

Como se puede ver, para los parámetros elegidos, las deformaciones y tensiones residuales que han sido determinadas muestran valores muy bajos, lo cual ayuda a evaluar el procedimiento de medición propuesto. Además estas deformaciones y tensiones son de carácter compresivo, lo cual siempre es conveniente en el caso de tener que hacer frente a sollicitaciones de fatiga [10]. Las componentes mostradas a lo largo del eje $y = 0$ tienen forma de V debido a que la componente F_{tx} de la fuerza tangencial de corte, que estaría gobernando el proceso de deformación plástica local, muestra para las diferentes combinaciones de parámetros de proceso y a lo largo del mismo eje, una distribución simétrica con el valor mínimo en el centro del eje y sus máximos en los extremos del mismo. Un rasgo significativo, revelado por las distribuciones de las mencionadas componentes de la deformación y tensión residual, es que las pendientes correspondientes a los valores de $x < 0$ son ligeramente mayores a aquellas que corresponden a $x > 0$. Esta asimetría puede ser explicada como sigue. Para $x > 0$ (Fig. 2(b)) el avance f y la componente V_y de la velocidad de corte tienen sentidos opuestos (corte ascendente), y para $x < 0$, tanto el avance como la mencionada componente tienen el mismo sentido (corte descendente). Las pendientes que corresponden a la zona de corte ascendente son ligeramente más bajas debido a que, en este tipo de corte, los insertos tienen un recorrido deslizante antes de penetrar el material, lo cual origina un pequeño incremento de deformación plástica local [5]. Por ejemplo, a partir del gráfico de la Fig. 5(b), las diferencias entre los valores absolutos de las pendientes que corresponden a corte descendente y ascendente fueron de 0.118 MPa/mm y 0.054 MPa/mm, para las profundidades de corte $d = 1.00$ mm y $d = 1.25$ mm, respectivamente. Se debe notar que, si bien las diferencias de pendientes son pequeñas, el método de medición propuesto puede detectarlas.

Por otra parte, las distribuciones de las deformaciones y tensiones a lo largo del eje $x = 0$ son lineales, pero con pendientes muy reducidas (Fig. 4). Es importante destacar que la forma de estas distribuciones respondería a la fuerte influencia, en el mencionado proceso de deformación plástica local, de la componente F_{tx} de la fuerza tangencial de corte, la cual no modifica su valor a lo largo de dicho eje $x = 0$. Es de destacar, también, que la otra componente de la fuerza tangencial de corte, F_{ty} , se mantiene nula a lo largo del mencionado eje.

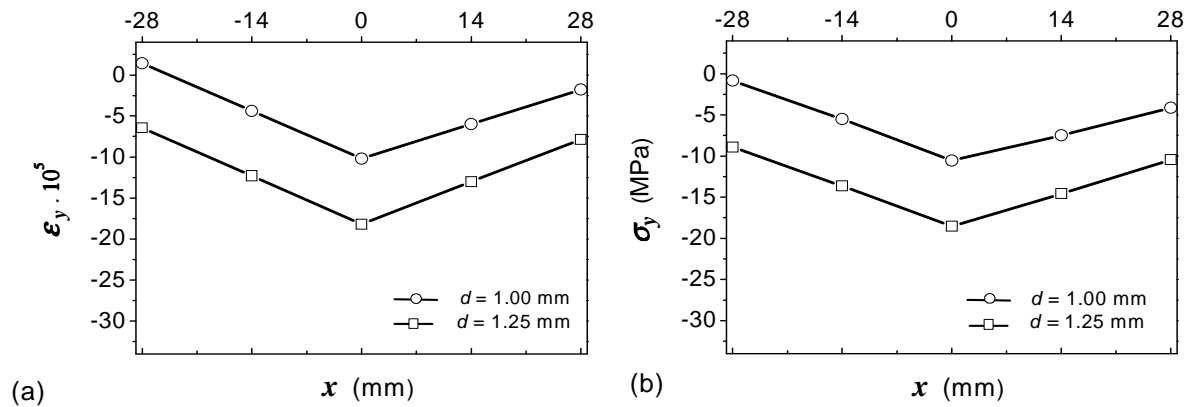


Figura 5. Distribuciones de las componentes (a) ϵ_y de la deformación y (b) σ_y de la tensión residual, a lo largo del eje $y = 0$ ($V = 1000$ m/min, $f = 0.2$ mm/rev).

5. CONCLUSIONES

El método de indentas longitudinales usado en este trabajo posibilita la determinación de deformaciones y tensiones residuales con entornos de errores de $\pm 0.001\%$ y ± 0.9 MPa, respectivamente. A partir de dicho método, fueron evaluadas diferentes distribuciones de deformaciones y tensiones residuales a lo largo de los ejes de simetría paralelo y normal a la dirección de avance de las muestras. Estas distribuciones resultaron ser de valores reducidos y de carácter compresivo. En todos los casos, el cambio en la profundidad de corte mantiene inalterable la forma de cada distribución y, a la vez, genera un ligero descenso en el nivel de las mismas. Por otra parte, los patrones que muestran dichas distribuciones responderían a los efectos mecánicos que genera la componente de la fuerza tangencial de corte que es perpendicular a la dirección de avance. Finalmente, las distribuciones evaluadas a lo largo del eje $y = 0$ revelan un grado de asimetría similar cuando se comparan las zonas correspondientes a corte ascendente con aquellas generadas por corte descendente.

REFERENCIAS

1. C.L. Dotson, R. Harlow and R.L. Thompson, "Fundamentals of Dimensional Metrology"; 2003, Thompson Delmar Learning, New York.
2. M.A. Curtis and F.T. Farago, "Handbook of Dimensional Measurement"; 2007, Industrial Press Inc., New York.
3. 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.
4. 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.
5. E.M. Trent, "Metal Cutting"; 1991, Butterworth/Heinemann, London.
6. H. Schulz, "High Speed Machining"; 1996, Carl Hanser, Munich.
7. 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.
8. P.R. Bevington and D.K. Robinson, "Data reduction and error analysis for the physical sciences"; 2002, McGraw-Hill, New York.
9. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, "Theory of Elasticity"; 1970, McGraw-Hill, New York.
10. D.W. Schwach and Y.B. Guo, "A fundamental study on the impact of surface integrity by hard turning on rolling contact fatigue"; Int. J. Fatigue, 28 (2006), p. 1838-1844.