



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

Evaluación de tensiones residuales inducidas por fresado de alta velocidad

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

(1) *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela, Bv. Roca 989, 2300 Rafaela, Argentina. felipe.diaz@frra.utn.edu.ar*

(2) *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)*

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

RESUMEN

En este trabajo, un método recientemente desarrollado que se basa en la modificación de la distancia entre indentas colineales es usado para evaluar diferentes estados de tensión residual, los cuales fueron generados en muestras de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6 fresadas a alta velocidad. Una de las ventajas que ofrece este método, el cual requiere de una máquina de medir universal, es que prescinde tanto del uso de equipos específicos como de operadores altamente calificados. Asimismo, a partir de la integración de un dispositivo de indentación a dicha máquina, el error absoluto de medición puede ser reducido.

Los ensayos de mecanizado fueron realizados usando una máquina fresadora vertical controlada numéricamente. A partir del uso de insertos de carburo de tungsteno de especial diseño para el maquinado de aleaciones de aluminio de alta resistencia, fue posible la generación de campos de tensiones residuales de valores muy reducidos, lo cual permitió evaluar la sensibilidad del método utilizado.

Los resultados obtenidos en muestras sometidas a distintas condiciones de corte revelan que, en los diferentes estados de tensión residual generados, las componentes normales de dicha tensión son compresivas y de módulo bajo. Al mismo tiempo, es posible advertir una correlación entre los valores de tensiones obtenidos y la profundidad de corte, mostrando la aleación AA 6082-T6 mayor susceptibilidad a ser tensada. Además, a partir de la sensibilidad del método usado, fue posible detectar una pequeña diferencia entre los niveles que alcanzan las componentes normales en las zonas correspondientes a corte ascendente y descendente, siendo dicha diferencia similar para ambas aleaciones evaluadas. Finalmente, las direcciones inherentes a las componentes principales de la tensión residual, lugar donde ocurre el estiramiento plástico local máximo, resultaron ser fuertemente dependientes de la dirección de laminado previa al maquinado.

Palabras Claves: Tensiones residuales, aleaciones de aluminio, fresado de alta velocidad, método de indentas.



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Las tensiones residuales son tensiones auto-equilibradas, de existencia previa a las cargas de servicio [1]. Estas tensiones, propias de un sólido, suelen desarrollarse cuando el mismo sufre deformación plástica no uniforme y/o esta sometido a gradientes térmicos, lo cual inevitablemente ocurre en diferentes procesos de fabricación tales como: fundición, laminado, soldadura, forjado o maquinado. Las tensiones residuales que se generan en el procesamiento de una componente mecánica pueden ser de tracción o compresión. Las primeras producen, en dicha componente, debilitamiento ante sollicitaciones de desgaste, fatiga y/o corrosión. En cambio, las compresivas suelen inducirse a fin de fortalecer a la misma ante sollicitaciones similares.

Durante el maquinado de una componente mecánica, las tensiones residuales introducidas son producto tanto de la deformación plástica local que genera la interacción con la herramienta de corte, como del calor conducido desde la zona primaria de deformación hacia la superficie que se está generando [2]. A su vez, tanto la deformación plástica local como el calor conducido dependen de las propiedades mecánicas del material maquinado como así también de los parámetros de proceso, de la geometría de la herramienta y de las condiciones de refrigeración. Es importante destacar que una pequeña variación en alguno de los parámetros seleccionados puede modificar sustancialmente el nivel y/o el signo de la distribución de tensiones residuales generada. Por lo tanto, es muy importante la determinación de dichos niveles y signos para saber si la componente maquinada ha sido fortalecida o debilitada en su superficie.

En las últimas décadas se han desarrollado y optimizado diferentes técnicas experimentales que han sido muy bien adaptadas para la determinación de las tensiones residuales que generan los diversos tipos de maquinado. De estas técnicas, dos han sido las más requeridas en componentes maquinadas: la difracción de rayos X [3-5] y el método de *hole-drilling* [6,7]. Por otra parte, en los últimos años, diferentes técnicas de indentación han sido utilizadas a fin de determinar tensiones residuales en componentes mecanizadas. En un trabajo reciente, Warren *et al.* [8], llevaron a cabo un estudio de nano-indentación enfocado a la comprensión de las relaciones básicas entre comportamiento mecánico, microestructura y tensiones residuales introducidas en componentes maquinadas. Luego, Wyatt y Berry [9] desarrollaron un método de indentación que posibilita realizar diferentes estudios de tensiones residuales en componentes mecanizadas a alta velocidad. Más recientemente, Díaz *et al.* [10,11] y Mammana *et al.* [12] estudiaron la influencia de los mecanismos térmicos y mecánicos en la generación de tensiones residuales en muestras de diferentes aleaciones de aluminio fresadas a alta velocidad usando un método de indentación optimizado.

El propósito de este trabajo es evaluar, en muestras de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6 fresadas a alta velocidad, tanto los niveles y signos que alcanzan las componentes normales de la tensión residual como así también las direcciones inherentes a los niveles máximos. Cabe destacar que, a partir de este análisis, es posible detectar para que direcciones la deformación plástica local encuentra su máximo. Las mencionadas componentes fueron obtenidas a partir de un método de indentación previamente optimizado [10]. Realizando operaciones de fresado frontal con corte central, fue posible subdividir la superficie generada en dos zonas adyacentes y de igual área denominadas de corte ascendente y descendente [13]. Estas operaciones de fresado fueron llevadas a cabo en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente. La profundidad de corte fue variada para evaluar como afecta esta modificación en los niveles y signos de las componentes normales. Finalmente, los baricentros de las zonas correspondientes a los cortes ascendente y descendente fueron analizados en forma independiente a fin de evaluar la sensibilidad del método utilizado en cuanto a su capacidad para detectar las direcciones donde la deformación plástica local encuentra su valor máximo.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La técnica de medición mencionada previamente consiste, en líneas generales, en introducir una serie de indentas equiespaciadas sobre la superficie a evaluar, para luego medir, antes y después de un tratamiento de distensión, las coordenadas de dichas indentas usando una máquina de medir universal. En este trabajo se utilizó un dispositivo indentador de especial diseño que se acopla al cabezal principal de la máquina de medir usada (GSIP MU-314), lo cual permite conseguir mayor



precisión tanto en la generación como en la localización óptica de cada una de las indentas. A partir de la integración de dicho dispositivo indentador es posible introducir indentas longitudinales, las cuales posibilitan reducir la incertidumbre de reposicionamiento de las muestras a posteriori del tratamiento de distensión [10]. Las coordenadas de estas indentas fueron medidas dentro de un rango de temperaturas de 20 ± 0.2 °C, con una tasa de variación menor a 0.01 °C/min. Cabe mencionar que si esta tasa es mayor al valor mencionado, los errores de medición aumentan significativamente. Con respecto al tratamiento de distensión, este se llevó a cabo por el término de 80 minutos, a una temperatura de 300 °C.

Los materiales evaluados en este trabajo fueron dos productos laminados de 4 mm de espesor, correspondientes a las aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6. Estas 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 σ_u (MPa)	Lim. Elástico $\sigma_{y_{0.2}}$ (MPa)	Elongación A (%)	Dureza HV0.5
6082-T6	Base	0.2	0.9	0.15	0.5	0.9	0.22	0.6	340	310	11	108
7075-T6	Base	5.6	2.52	1.72	0.32	0.2	0.17	0.16	570	505	11	86

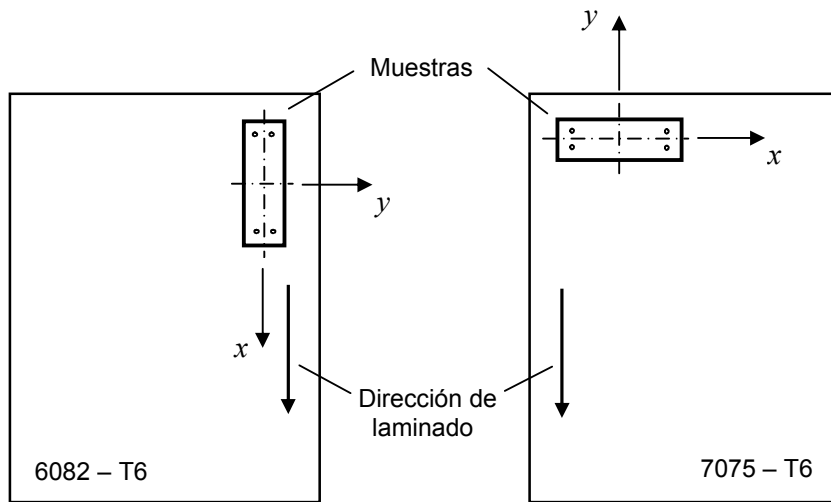


Figura 1 *Dirección de laminado en muestras*

Las dimensiones de las muestras evaluadas fueron de 110 mm x 40 mm x 4 mm. En el caso del material 6082-T6, el eje longitudinal de las muestras coincide con la dirección original de laminado. En cambio, en el material 7075-T6, la dirección que coincide con la de laminado es la transversal. La Fig. 1 muestra un esquema de cómo fueron cortadas las probetas a partir de las placas laminadas originales. Previamente a los ensayos de mecanizado, las muestras 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 300 °C y 80 minutos, respectivamente. Para los ensayos de mecanizado 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 proceso seleccionados para este trabajo. Los ensayos fueron llevados a cabo 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. 2.

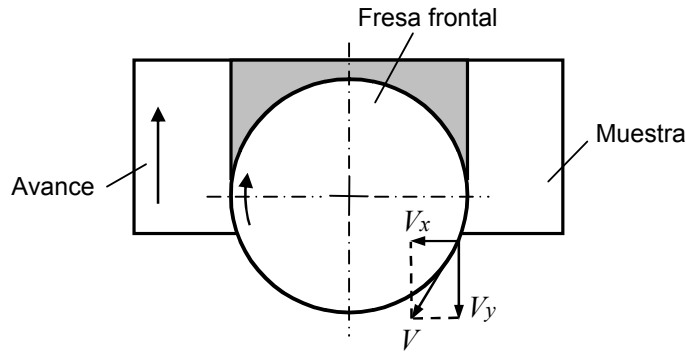


Figura 2 Vista superior del sistema herramienta-muestra.

Tabla 2 Geometría de la herramienta y parámetros de corte

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

3. DETERMINACION DE LAS COMPONENTES DE LA TENSION RESIDUAL

A partir del presente método de medición de desplazamientos residuales es posible evaluar el estado de tensión en cualquier punto de la superficie generada. Tomando en cuenta un estudio previo [10], dos puntos significativos fueron seleccionados para este trabajo. La Fig. 3 muestra estos puntos (A y B), los cuales se ubican en los baricentros de las zonas de corte ascendente y descendente.

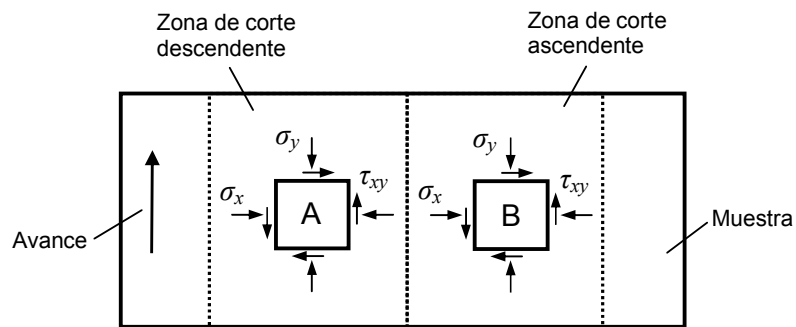


Figura 3 Baricentros correspondientes a las zonas de corte ascendente y descendente.

Para cada uno de estos baricentros, 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 un cuadrado definido por indentas, como el que se muestra en la Fig. 4. La restante dirección (inherente a ϵ_d) corresponde a la bisectriz de las anteriores. Dichas componentes normales de la deformación residual pueden ser expresadas como

$$\epsilon_x = \frac{l_x}{l'_x} - 1$$



$$\varepsilon_y = \frac{l_y}{l'_y} - 1$$

$$\varepsilon_d = \frac{l_d}{l'_d} - 1 \quad (1)$$

donde l_x y l'_x son los valores medios de los lados horizontales del cuadrado definido por indentas 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_d y l'_d corresponden a la diagonal de pendiente positiva de dicho cuadrado, también antes y después de la distensión, respectivamente. Luego, a partir de estas componentes normales es posible obtener la componente tangencial [14]

$$\gamma_{xy} = 2 \cdot \varepsilon_d - \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (2)$$

Asumiendo que la superficie generada se halla bajo un estado plano de tensiones y que el material evaluado es elástico lineal, homogéneo e isótropo, las componentes de la tensión residual σ_x , σ_y y τ_{xy} pueden ser obtenidas [15]. Finalmente, las componentes normal y tangencial asociadas a una dirección arbitraria θ (ver Fig. 4) pueden ser halladas a través de

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

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (3)$$

Por otra parte, los errores inherentes a las componentes de la deformación y tensión residual fueron obtenidos a partir del error absoluto correspondiente a las distancias 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 inherente al error absoluto probable [16], los entornos obtenidos para las mencionadas componentes de la deformación y tensión residual fueron $\pm 0.001 \%$ y $\pm 0.9 \text{ MPa}$, respectivamente.

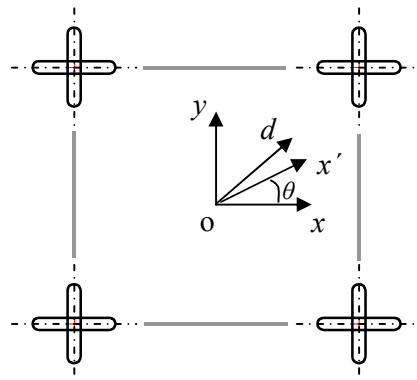


Figura 4 Distribución de indentas longitudinales.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 5 es posible advertir que independientemente del material, baricentro y combinación de parámetros evaluada, las componentes σ_x y σ_y de la tensión residual son predominantemente compresivas. Esto es debido a que, para el caso de fresado frontal, el filo de corte secundario interactúa con la muestra en forma intermitente, lo cual genera una mayor deformación de tracción detrás de dicho filo de corte [2]. Luego la zona de deformación es descargada, lo cual conduce a un estado de tensión compresivo.

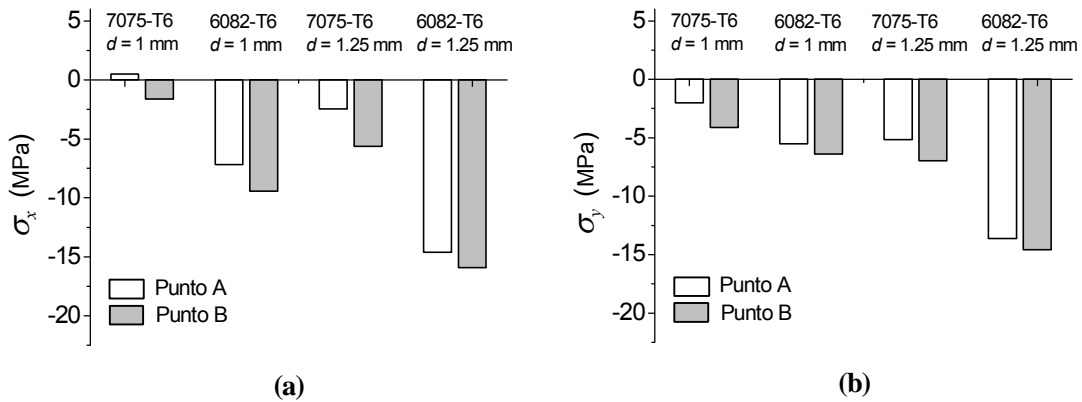


Figura 5 Componentes (a) σ_x y (b) σ_y de la tensión residual (velocidad de corte: $V = 1000$ m/min, avance: $f = 0.2$ mm/rev).

La Fig. 5 (a) muestra la componente normal σ_x . Es importante destacar que la dirección x es normal a la dirección de avance. En esta figura se observa que los valores máximos –en valor absoluto– corresponden al baricentro de la zona de corte ascendente (punto B). También, es posible observar que, en el material 6082-T6, los niveles son más compresivos, y además, que estos niveles se reducen, en ambos materiales, cuando aumenta la profundidad de corte. En cuanto a la Fig. 5 (b), el comportamiento de la componente σ_y es similar al de la componente σ_x . Sin embargo, al comparar ambas componentes es posible advertir que, para el material 6082-T6, $\sigma_x > \sigma_y$ y, para el material 7075-T6, $\sigma_y > \sigma_x$.

En cada una de las probetas fresadas, las pequeñas diferencias de niveles encontradas entre el corte ascendente y descendente obedecería a la influencia que tiene la orientación relativa entre la componente V_y y la velocidad de avance f (ver Fig. 2) sobre la generación de deformación plástica local [10]. En cuanto a los niveles más compresivos alcanzados en el material 6082-T6, estos responderían a motivos térmicos ya que las fuerzas de corte son mayores para el caso del material 7075-T6. Las diferencias encontradas podrían ser debidas a las diferentes fracciones de energía calórica desde la zona primaria de deformación hacia la superficie maquinada, la cual es siempre más alta para el caso del material 6082-T6 debido, principalmente, a su mayor conductividad térmica [10]. Las componentes normales σ_p y σ_q , las cuales corresponden a las direcciones principales, son mostradas en la Fig. 6. Es importante mencionar que dichas direcciones, ortogonales entre si, son aquellas donde las componente normal σ_x alcanza sus valores máximo y mínimo [14]. La Fig. 6 (a) describe el comportamiento de σ_p , que es la componente principal más compresiva. Este comportamiento se revela similar al de la componente σ_y , mostrando mayor acuerdo para el caso del material 7075-T6. Por otra parte, la Fig. 6 (b) describe el comportamiento de σ_q , que es la componente principal menos compresiva. Este comportamiento se acerca al de la componente normal σ_x , mostrando también mayor acuerdo para el caso del material 7075-T6.

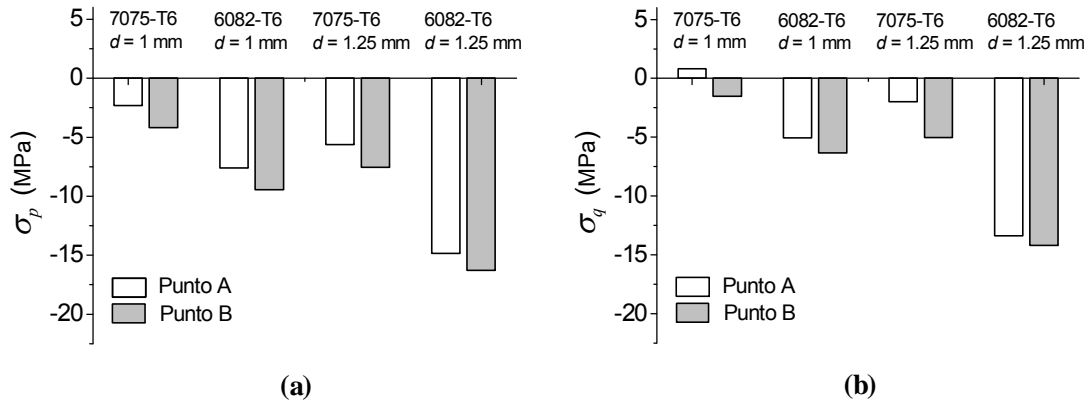


Figura 6 Componentes (a) σ_p y (b) σ_q de la tensión residual (velocidad de corte: $V = 1000$ m/min, avance: $f = 0.2$ mm/rev).

En la Fig. 7 se observan los niveles que alcanzan las componentes normales σ_r y σ_t , las cuales son inherentes a las direcciones radial y tangencial, respectivamente. Estas direcciones, normales entre sí, y además, diferentes para cada baricentro, se muestran en la Fig. 8. Si bien dicha Fig. 7 muestra comportamientos similares, los niveles de σ_r se acercan más a los de σ_y , y además, a los de las componentes principales σ_p (7075-T6) y σ_q (6082-T6). En cambio, los niveles que alcanza σ_t son muy parecidos a los de σ_x , y además, a los de las componentes principales σ_p (6082-T6) y σ_q (7075-T6).

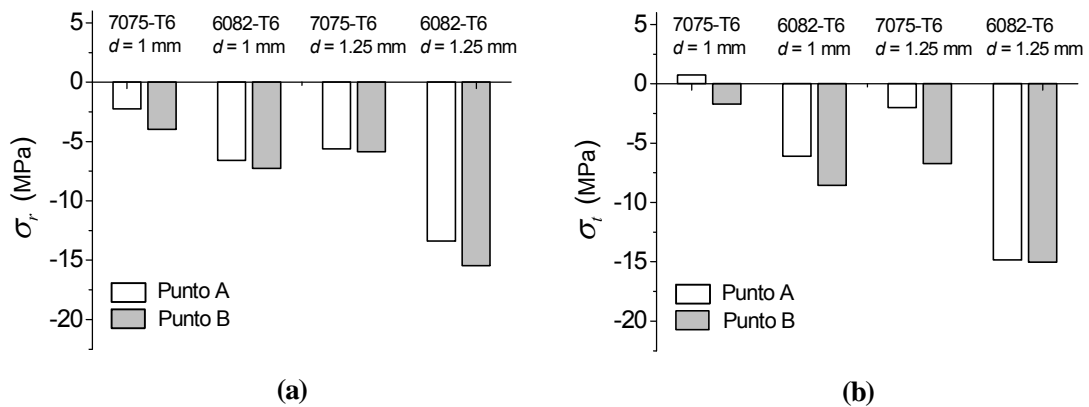


Figura 7 Componentes (a) σ_r y (b) σ_t de la tensión residual (velocidad de corte: $V = 1000$ m/min, avance: $f = 0.2$ mm/rev).

La similitud entre las componentes σ_r y σ_y era esperable debido a que la diferencia angular entre las direcciones inherentes es de solo 26.4° (ver Fig. 8). Lo propio ocurre entre σ_t y σ_x , ya que sus direcciones también difieren en 26.4° . En cuanto a las componentes principales σ_p (7075-T6) y σ_q (6082-T6), su similitud con σ_r y σ_y estaría indicando que las direcciones inherentes a dichas componentes principales estarían cercanas tanto a la dirección radial como a la de avance. Por otro lado, la similitud de σ_p (6082-T6) y σ_q (7075-T6) con σ_t y σ_x estaría indicando que las direcciones de



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

estas componentes principales estarían cercanas tanto a la dirección tangencial como a la normal a la dirección de avance. En la Fig. 8 se muestran las direcciones inherentes a la componente principal más compresiva. Estas direcciones se obtuvieron al evaluar ambos materiales y baricentros a partir de la combinación de parámetros que incluye a la profundidad de corte $d = 1$ mm. En ambos baricentros, las direcciones que corresponden al material 6082-T6 se hallan situadas entre la dirección tangencial y la dirección normal a la de avance (eje x). En cambio, para el material 7075-T6, dichas direcciones se encuentran entre la dirección tangencial y la de avance (eje y). Debido a que esta última coincide con la dirección del laminado original del material 7075-T6 y que la dirección normal a la de avance (eje x) coincide con la dirección del laminado original del material 6082-T6 (ver Fig. 1), los resultados obtenidos estarían indicando que estas direcciones ortogonales de laminado estarían ejerciendo la mayor influencia en cuanto a la ubicación de las direcciones principales más compresivas. Como se esperaba, los resultados obtenidos estarían también mostrando que, la ubicación final de dichas direcciones principales, asociadas a aquellas donde ocurre el máximo estiramiento plástico de la capa superficial, estaría respondiendo también a la fuerte influencia de la dirección tangencial de corte. De esta manera, las direcciones donde dicho estiramiento plástico es máximo se encuentran rotando un cierto ángulo desde la dirección de laminado hacia la dirección tangencial, lo cual se cumple en ambos materiales y en ambos baricentros. Finalmente, a partir de que, en el material 7075-T6, el ángulo comprendido entre la dirección de laminado y la dirección tangencial es mayor que en el caso del material 6082-T6, es posible inferir que la influencia principal, en cuanto a la dirección donde ocurre la mayor deformación plástica local, la estaría ejerciendo la dirección de laminado ya que la dirección principal se halla más cerca de esta última que de la tangencial de corte.

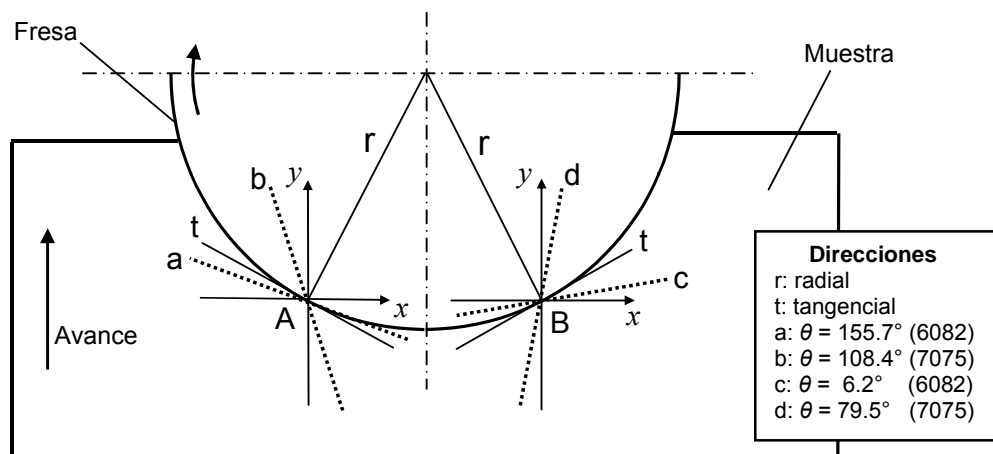


Figura 8 Direcciones inherentes a la componente principal más compresiva en baricentros A y B (velocidad de corte: $V = 1000$ m/min, avance: $f = 0.2$ mm/rev, profundidad de corte $d = 1$ mm).

5. CONCLUSIONES

El método de indentas utilizado en este trabajo posibilitó llevar a cabo un análisis exhaustivo de componentes normales de la tensión residual como así también de direcciones principales en baricentros de zonas de corte diferentes y materiales diferentes. La profundidad de corte fue variada para evaluar la modificación de las mencionadas componentes. A pesar de que los niveles que alcanzan estas componentes son muy bajos, la técnica utilizada puede captar las pequeñas diferencias que se generan al cambiar la profundidad de corte, la zona de corte y el material evaluado. Estas componentes son predominantemente compresivas debido, principalmente, a que el fresado frontal genera una mayor deformación de tracción detrás del filo de corte. Por otra parte, las diferencias de niveles entre ambos materiales podrían ser debidas a las diferentes fracciones de energía calórica que se deriva hacia la superficie maquinada, la cual es siempre más alta para la



UTN.BA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
FACULTAD REGIONAL BUENOS AIRES



FoDAMI

aleación 6082-T6 debido, principalmente, a su mayor conductividad térmica. En cuanto a las tensiones principales más compresivas, la dirección de laminado estaría ejerciendo la mayor influencia debido a que las direcciones principales, lugar donde el estiramiento plástico local se hace máximo, se encuentran muy cercanas a dichas direcciones de laminado.

6. REFERENCIAS

- [1] Lu, J. (ed) (1996) *Handbook of measurement of residual stresses*, SEM. Fairmont Press Inc., Lilburn, GA
- [2] Brinksmeier, E.; Cammett, J.T.; König, W.; Leskovaar, P.; Peters, J.; Tonshoff, H.K. (1982) "Residual stresses — measurement and causes in machining processes". *Annals of the CIRP* 31, 491–510.
- [3] Fuh, K.H.; Wu, C. (1995) "A residual stress model for the milling of aluminium alloy (2014-T6)". *J. Mater. Proc. Tech.*, 51: 87-105.
- [4] M'Saoubi, R.; Outeiro, J.C.; Changeux, B.; Lebrun, J.L.; Morão Dias, A. (1999). "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316 steels". *J. Mater. Proc. Tech.*, 96: 225-233.
- [5] Hua, J.; Shivpuri, R.; Cheng, X.; Bedekar, V.; Matsumoto, Y.; Hashimoto, F.; Watkins, T.R. (2005) "Effect of feed rate, workpiece hardness and cutting edge on subsurface residual stress in the hard turning of bearing steel using chamfer + hone cutting edge geometry". *Mater. Sci. Eng. A*, 394: 238-248.
- [6] Bouzid Saï, W.; Ben Salah, N.; Lebrun, L. (2001) "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics". *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 4: 443-450.
- [7] Capello, E. (2005) "Residual stresses in turning. Part I: Influence of process parameters". *J. Mater. Proc. Tech.*, 160: 221-228.
- [8] Warren, A.W.; Guo, Y.B.; Weaver, M. (2005) "The influence of machining induced residual stress and phase transformation on the measurement of subsurface mechanical behaviour using nanoindentation". *Surf. Coat. Technol.*, 200: 3459-3467.
- [9] Wyatt, J.E.; Berry, J.T. (2006) "A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes". *J. Mater. Proc. Tech.*, 171: 132-140.
- [10] Díaz, F.V.; Bolmaro, R.E.; Guidobono, A.P.M.; Girini, E.F. (2010) "Determination of residual stresses in high speed milled aluminium alloys using a method of indent pairs". *Exp. Mech.* 50, 205-215.
- [11] Díaz, F.V.; Mammana, C.A. (2012) Study of residual stresses in conventional and high-speed milling. En: L.A. Filipovic, Editor. *Milling: Operations, Applications and Industrial Effects*. Nova Science Publishers, Inc., New York, pp. 127-155.
- [12] Mammana, C.A.; Díaz, F.V.; Guidobono, A.P.M.; Bolmaro, R.E. (2010) "Study of residual stress tensors in high-speed milled specimens of aluminium alloys using a method of indent pairs". *Res. J. Appl. Sci. Eng. Tech.* 2, 749-756.
- [13] Trent, E.M. (1991) *Metal Cutting*. Butterworth/Heinemann, London.
- [14] Gere, J.M. (2001) *Mechanics of Materials. 5th Edn*. Brooks/Cole, Pacific Grove, CA.
- [15] Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. (1970) *Theory of Elasticity, 3rd edn*. McGraw-Hill, New York.
- [16] Bevington, P.R.; Robinson, D.K. (2002) *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. McGraw-Hill, New York.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer a Eduardo Cravero y Silvio Acosta por la asistencia brindada durante los ensayos de maquinado de alta velocidad.