



## ANÁLISIS DE TENSIONES RESIDUALES EN MUESTRAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO AA 7075-T6 MECANIZADAS A BAJA Y ALTA VELOCIDAD

Felipe V. Díaz<sup>(1,2)</sup>, Claudio A. Mammana<sup>(1)</sup> y Armando P.M. Guidobono<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería Electromecánica – Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad Regional Rafaela, Universidad Tecnológica Nacional, Acuña 49, 2300 Rafaela, Argentina.

<sup>(2)</sup>Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina.

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

Correo Electrónico (autor de contacto): [felipe.diaz@frra.utn.edu.ar](mailto:felipe.diaz@frra.utn.edu.ar)

**Palabras claves:** Tensiones residuales, Mecanizado, Aleación de aluminio, Método de micro-indentas

### RESUMEN

*Si bien el mecanizado de alta velocidad ofrece una serie de ventajas con respecto al mecanizado convencional, es posible que las distribuciones de tensiones residuales generadas por el primero puedan afectar la vida útil en servicio de las componentes procesadas. En este trabajo, un método de micro-indentas recientemente desarrollado es usado para evaluar diferentes estados de tensión residual, los cuales fueron introducidos en muestras de aleación de aluminio AA 7075-T6 fresadas a baja y alta velocidad. Diferentes superficies fueron generadas variando la velocidad de corte en un orden de magnitud, de 100 m/min a 1000 m/min. Dos protocolos de maquinado, basados en el uso de máquinas herramientas diferentes, fueron evaluados. Los resultados obtenidos muestran que es posible la generación y evaluación de tensiones residuales muy reducidas. Finalmente, los valores y niveles obtenidos fueron analizados en función de los mecanismos térmicos y mecánicos que se activan para dar origen a dichas tensiones.*

**Keywords:** Residual stresses, Machining, Aluminium alloy, Micro-indent method

### ABSTRACT

*Although the high-speed machining offers a number of advantages over conventional machining, it is possible that residual stress distributions generated by the first can affect the service life of the processed components. In this paper, a newly developed micro-indent method is used to evaluate different residual stress states, which were introduced in samples of AA 7075-T6 aluminium alloy milled at low and high-speed. Different surfaces were generated by varying the cutting speed in one order of magnitude, from 100 m/min to 1000 m/min. Two machining protocols, which consist of using different machine tools, were evaluated. The results show that it is possible the generation and evaluation of very small residual stresses. Finally, the obtained values and levels were analyzed in function of mechanical and thermal mechanisms, which are activated to generate such stresses.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Durante el mecanizado de una componente mecánica se introducen, inevitablemente, tensiones residuales. Estas tensiones son producto de la deformación plástica local que genera la interacción de la herramienta de corte con dicha componente, y también, del calor conducido desde la zona primaria de deformación hacia la superficie que se está generando [1,2]. A su vez, tanto la deformación plástica local como el calor conducido dependen de las propiedades mecánicas del material mecanizado como así también de los parámetros de proceso, de la geometría, diseño y estado de la herramienta de corte, y también, de las condiciones de refrigeración. Es importante destacar que una pequeña variación en alguno de los

parámetros de proceso seleccionados puede modificar sustancialmente el nivel y/o 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 mecanizada ha sido fortalecida o debilitada en su superficie.

Los métodos para la medición de tensiones residuales pueden ser clasificados en directos e indirectos. Los primeros consisten en la determinación de las componentes de la tensión residual a partir de la medición de diferentes propiedades físicas, las cuales son alteradas por la introducción de dichas tensiones. En cambio, los métodos indirectos requieren romper el equilibrio tanto de fuerzas como de momentos en la componente tensada. Esto último se consigue a partir de la realización de un corte o bien de algún tipo de remoción de parte del material evaluado. Entre los primeros, la difracción de rayos X ha sido la técnica más utilizada en cuanto a la evaluación de tensiones residuales en superficies generadas por mecanizado [3,4]. En cuanto a las técnicas indirectas, el método más usado ha sido el de agujero pasante, más comúnmente conocido como *hole-drilling* [5,6].

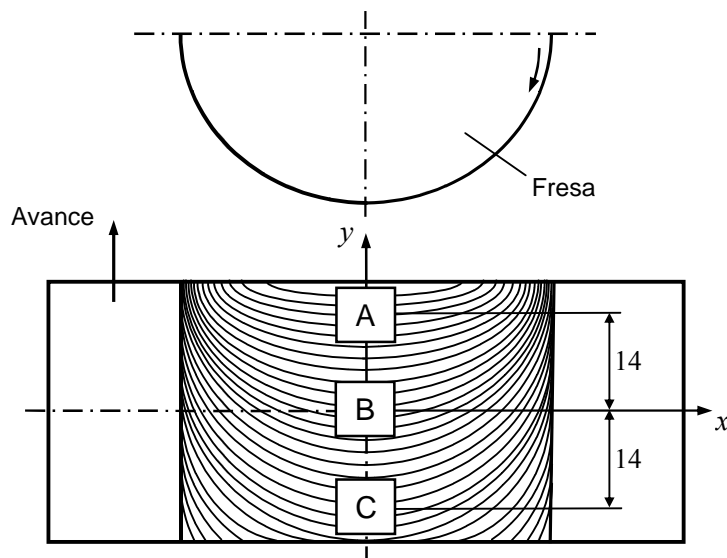
Por otra parte, en los últimos años han sido desarrolladas diferentes técnicas que posibilitan determinar tensiones residuales a partir de la introducción, en la superficie generada, de micro o nano-indentas. La mayoría de estos métodos comparan la profundidad de contacto o bien la curva carga-desplazamiento correspondiente a muestras tensadas y destensadas, a partir de las cuales las diferentes componentes de la tensión residual pueden ser estimadas [7,8]. Recientemente, Wyatt y Berry [9] desarrollaron una técnica basada en el cambio que ocurre en la distancia entre micro-indentas introducidas en la superficie generada cuando la componente mecanizada es sometida a un tratamiento de distensión. Más recientemente, a partir de una versión optimizada de esta técnica, fue posible la realización de diferentes estudios a fin de evaluar la influencia que ejercen los parámetros de proceso inherentes al mecanizado de alta velocidad en la generación de tensiones residuales en muestras de diferentes aleaciones de aluminio [10-12].

Determinar tensiones residuales del orden de  $\pm 10$  MPa, o aún más bajas, con errores de medición muy reducidos no es posible usando las técnicas de medición tradicionales tales como la difracción de rayos X o el método de *hole-drilling*. El propósito de este trabajo consistió en la generación de tensiones residuales superficiales compresivas muy reducidas y en el análisis de las mismas a partir de la técnica de micro-indentas previamente mencionada. Las tensiones residuales fueron introducidas en muestras de aleación de aluminio AA 7075-T6. Los ensayos de mecanizado se llevaron a cabo a partir de dos protocolos, cada uno de los cuales utilizó un determinado tipo de máquina herramienta. La prestación de estas máquinas fue evaluada usando la misma herramienta de corte para ambos casos. Cabe destacar que dichas máquinas, centro de mecanizado CNC Victor Vc-55 y fresadora vertical CNC Clever CMM-100, presentan estados de desgaste diferentes. Los resultados obtenidos muestran que, para ambos protocolos, las tensiones residuales resultaron compresivas, de niveles muy reducidos. Las componentes normales de dicha tensión residual fueron exhaustivamente analizadas en función de su dirección inherente. Finalmente, los resultados obtenidos para estas componentes fueron correlacionados en términos de los mecanismos térmicos y mecánicos que se activan para dar origen a las mencionadas tensiones.

## 2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este trabajo se llevaron a cabo ensayos de fresado frontal con corte central a fin de determinar los principales efectos de la interacción de diferentes parámetros de proceso sobre las tensiones residuales inducidas. Estas tensiones fueron determinadas en 3 puntos de cada superficie generada. La Fig. 1 muestra dicha superficie (63 x 40 mm) y la ubicación de estos puntos, los cuales se hallan a lo largo de la línea central que separa la zona de corte ascendente ( $x > 0$ ,  $y$ ) de la zona de corte descendente ( $x < 0$ ,  $y$ ). Como fuera mencionado previamente, dichos ensayos fueron llevados a cabo usando la misma herramienta e insertos en máquinas herramientas diferentes: un centro de mecanizado vertical controlado numéricamente (Victor Vc-55), instalado en un laboratorio, y una máquina fresadora vertical, también controlada numéricamente (Clever CMM-100), instalada en una industria de alta producción. La Tabla 1 muestra las diferentes combinaciones de parámetros de proceso para cada ensayo, y también, a que máquina corresponde cada uno de los mismos.

El material a mecanizar consistió en una aleación de aluminio AA 7075 – T6. La Tabla 2 muestra tanto la composición química como las características mecánicas de este producto laminado de 4 mm de espesor. Este material fue maquinado en su condición de recocido, a fin de asegurar un estado libre de tensiones residuales antes del mecanizado. El tratamiento térmico fue llevado a cabo luego de preparar la geometría de las probetas. En cuanto a los valores inherentes a dicho tratamiento térmico, estos fueron 573 K para la temperatura y 80 minutos para el tiempo. Finalmente, el proceso de enfriamiento se llevó a cabo en el propio horno (Dalvo HM2).



**Figura 1.** Superficie generada. Las medidas entre puntos evaluados están en mm.

**Tabla 1.** Parámetros de proceso seleccionados

Número de ensayo y máquina utilizada	Parámetros de proceso			
	Velocidad de corte $V$ (m/min)	Avance por diente $f_z$ (mm/diente)	Velocidad de la mesa $v_f$ (m/min)	Profundidad de corte $d$ (mm)
1 - Victor	100	0.16	0.4	0.40
2 - Victor	1000	0.16	4.0	0.40
3 - Clever	1000	0.04	1.0	1.00
4 - Clever	1000	0.04	1.0	1.25

**Tabla 2.** Composición química y propiedades elásticas y mecánicas del material investigado

Composición química (% peso)								Propiedades elásticas y mecánicas				
Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	$E$ (GPa)	$\nu$	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_{y_{0.2}}$ (MPa)	A (%)
Base	5.6	2.52	1.72	0.32	0.2	0.17	0.16	70	0.33	564	514	11

Los detalles inherentes a la técnica de indentas utilizada para la determinación de las distintas componentes de la tensión residual se pueden encontrar en estudios previos [10-12]. En líneas generales, esta técnica consiste en introducir una serie de micro-indentas en la superficie a evaluar, para luego medir, antes y después de un tratamiento de distensión térmica, las coordenadas de las mismas usando una máquina de medir universal (MMU) de alta precisión [13]. Cabe destacar que estas máquinas son muy versátiles, posibilitando la realización de diversos tipos de mediciones en componentes mecánicas, incluyendo la determinación de las coordenadas ortogonales ( $x, y, z$ ) en cualquier punto de las mismas a partir de la incorporación de un microscopio micrométrico de alta precisión en el cabezal principal de la máquina. Para la realización de los mencionados ensayos de mecanizado, se usó una fresa frontal de 63 mm de diámetro. Cinco insertos equi-espaciados (Palbit SEHT 1204 AFFN-AL SM10) de carburo de tungsteno fueron incorporados a dicha herramienta de corte. Es importante mencionar que estos insertos fueron especialmente diseñados para el mecanizado de aleaciones de aluminio de alta resistencia.

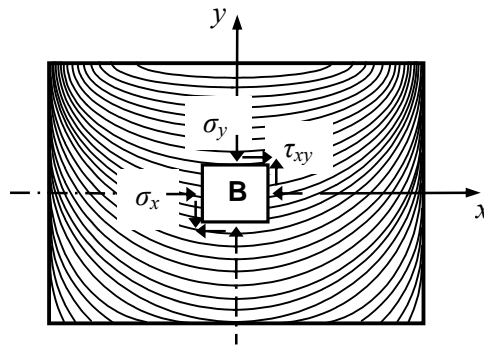
La Fig. 2 muestra el estado de tensiones residuales en el baricentro de la superficie generada (punto B). Para obtener las componentes normales de la tensión residual ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ) en cualquier punto de dicha superficie, se deben introducir 4 micro-indentas en los vértices de un cuadrado cuyo baricentro es el punto a evaluar [11]. Como fuera mencionado previamente, a partir de la introducción de dichas micro-indentas es posible medir, antes y después de un tratamiento de distensión, las coordenadas de las mismas usando una MMU. Luego, a través del procesamiento de estas coordenadas [12], es posible obtener las componentes normales de la deformación residual ( $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ), las cuales corresponden al baricentro del mencionado cuadrado. A partir de estas componentes y asumiendo que la superficie evaluada se halla bajo condiciones de tensión plana [14], las componentes normales de la tensión residual, para el caso de un material elástico lineal, homogéneo e isótropo pueden ser expresadas como

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

$$\sigma_y = k_1 \cdot \varepsilon_y + k_2 \cdot \varepsilon_x \quad (1)$$

donde  $k_1 = E/(1-\nu^2)$ ,  $k_2 = \nu \cdot k_1$ ,  $E$  es el módulo de elasticidad longitudinal y  $\nu$  es la razón de Poisson.

En cuanto al error inherente a este procedimiento, el mismo pudo ser estimado en  $\pm 0.9$  MPa [10]. Es importante notar que las coordenadas de las mencionadas micro-indentas fueron medidas dentro de un rango de temperaturas de  $20 \pm 0.2$  °C, con una tasa de variación menor a  $0.01$  °C/min. Cabe mencionar que si esta tasa resulta mayor al valor mencionado, el error de medición aumentará significativamente.



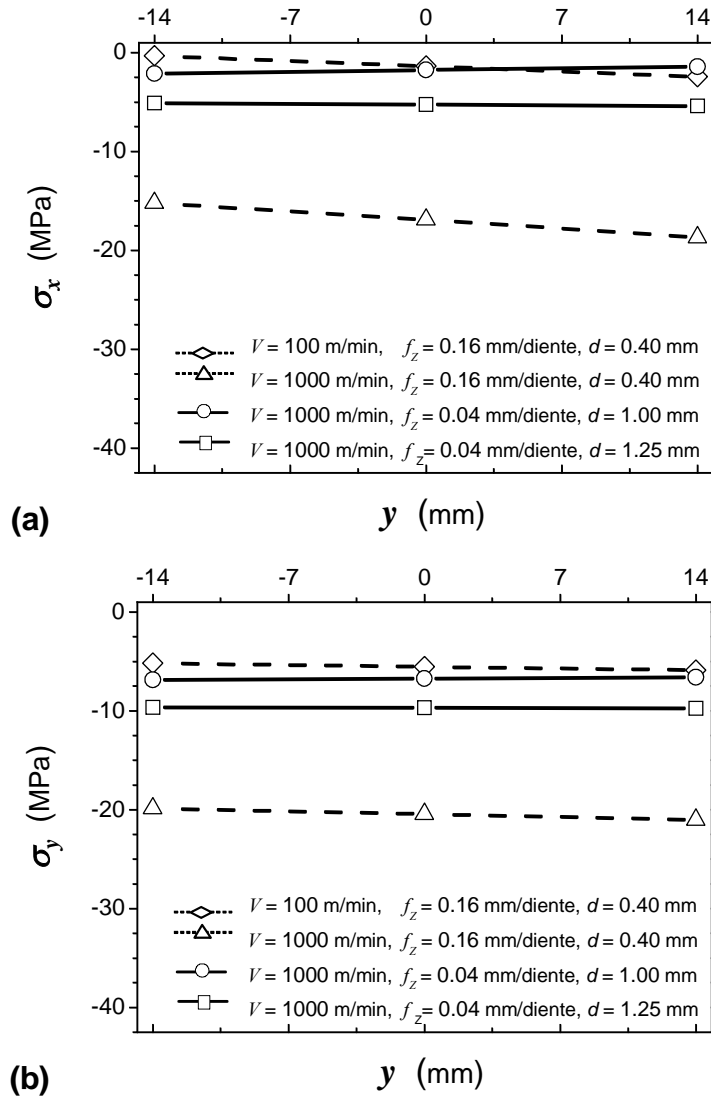
**Figura 2.** Componentes de la tensión residual en el baricentro de la superficie generada.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Fig. 3 muestra las distribuciones inherentes a las componentes normales de la tensión residual a lo largo del eje de simetría paralelo a la dirección de avance. La coordenada  $y$  de los puntos evaluados A, B y C corresponde a 14, 0 y -14 mm, respectivamente (ver Fig. 1). En la Fig. 3 (a) se comparan aquellas distribuciones que solo difieren en la velocidad de corte (un orden de magnitud), y además, aquellas que solo difieren en la profundidad de corte (25%). Como se esperaba, la modificación de la velocidad de corte genera una diferencia de nivel en la componente  $\sigma_x$  que resulta mayor a la que produce el cambio de la profundidad de corte. Al aumentar la velocidad de corte o bien la profundidad de corte, las tensiones se transforman en más compresivas. Por otra parte, la Fig. 3 (b) muestra los resultados obtenidos para la componente  $\sigma_y$ . Si bien las pendientes de las distribuciones inherentes a esta componente son más pequeñas, los resultados son similares a los de la Fig. 3 (a). Los niveles de  $\sigma_y$  parecieran estar desplazados alrededor de 4 MPa con respecto a los de  $\sigma_x$ . Cabe destacar que este desplazamiento de niveles estaría dado hacia una zona más compresiva.

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos al realizar la sustracción entre las tensiones normales  $\sigma_y$  y  $\sigma_x$ , para cada uno de los ensayos llevados a cabo y en cada punto evaluado. El valor medio para dicha sustracción resultó ser de 4.254 MPa, con una desviación estándar de 0.769 MPa, la cual corresponde a un coeficiente de variación del 18%. Estos valores de dispersión inherentes a la mencionada sustracción, los cuales son posibles de obtener usando el presente método de medición, ayudan a predecir un evidente

vínculo entre la combinación de deformación plástica local (efecto mecánico) y calor derivado a la superficie generada (efecto térmico), para ambas direcciones ortogonales evaluadas.



**Figura 3.** Componentes de la tensión residual (a)  $\sigma_x$  y (b)  $\sigma_y$  a lo largo del eje  $x = 0$ .

**Tabla 3.** Sustracción de componentes normales de la tensión residual

Puntos evaluados	$\sigma_y - \sigma_x$ (MPa)			
	Máquina Victor		Máquina Clever	
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4
A	3.45	2.36	5.20	4.35
B	3.96	3.54	4.96	4.45
C	4.86	4.66	4.72	4.54

Por otra parte, la Tabla 4 muestra los valores de los incrementos que corresponden a las componentes normales  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$ . Para la máquina Victor, estos incrementos corresponden al cambio en la velocidad de corte; para la máquina Clever, los mismos corresponden al cambio en la profundidad de corte. Es importante destacar que todos los incrementos que muestra dicha Tabla 4 son negativos. Para los ensayos llevados a cabo en la máquina Victor, los valores medios para  $\Delta\sigma_x$  y  $\Delta\sigma_y$ , resultaron ser de -15.56 MPa y -14.99 MPa, respectivamente. Para los ensayos realizados en la máquina Clever, los valores medios para dichos incrementos resultaron ser de -3.47 MPa y -2.96 MPa, respectivamente. En ambas máquinas, la similitud entre incrementos que corresponden a direcciones ortogonales indica que la modificación de uno de los parámetros de proceso estaría generando, para ambas direcciones, cambios similares en cuanto a la combinación de deformación plástica local y calor que llega a la superficie generada. Evaluando cada uno de los valores que muestra la Tabla 4, es posible establecer la siguiente relación entre incrementos de componentes ortogonales

$$\Delta\sigma_x/\Delta\sigma_y \approx 1.1 \quad (2)$$

A partir de esta relación se podría agregar que, en ambas direcciones, las componentes normales de la tensión residual muestran una sensibilidad similar ante la modificación de uno de los parámetros principales de proceso, lo cual se cumple para los ensayos llevados a cabo en ambas máquinas.

**Tabla 4.** Incrementos correspondientes a las tensiones normales

Puntos evaluados	Máquina Victor		Máquina Clever	
	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)	$\Delta\sigma_x$ (MPa)	$\Delta\sigma_y$ (MPa)
A	-16.24	-15.15	-3.98	-3.13
B	-15.53	-15.11	-3.47	-2.96
C	-14.90	-14.70	-2.97	-2.79

En cuanto al patrón inherente a la sustracción de las componentes normales observado en la Tabla 3, este resultó ser independiente tanto de la maquina herramienta evaluada como de la combinación de parámetros de proceso seleccionada. Si bien el hecho de que las componentes normales  $\sigma_y$  sean mayores (en valor absoluto) que las  $\sigma_x$  es infrecuente, ha sido informado previamente en un trabajo acerca de componentes maquinadas vía fresado [15], aunque no explicado. En otro trabajo, llevado a cabo por Jacobus *et al.* [16], con resultados obtenidos a partir de un acero AISI 4340, las componentes normales  $\sigma_y$  también resultaron mayores que las  $\sigma_x$  pero la mayoría de los valores obtenidos fueron de tracción. En el presente caso, todas las distribuciones obtenidas son compresivas. Las posibles causas que generan estas tensiones compresivas a lo largo de la línea central se analizan a partir de la Fig. 4. El patrón de niveles obtenido en los diferentes ensayos que corresponden al presente trabajo se muestra en la Fig. 4 (a). Si bien ambos niveles son compresivos, el correspondiente a la componente  $\sigma_y$  es ligeramente mayor en valor absoluto. Por otra parte, los niveles mostrados en la Fig. 4 (b) representan los roles relativos de los mecanismos térmicos y mecánicos en la generación de tensiones residuales. Es conocido que las tensiones compresivas son, en principio, producto de efectos mecánicos, y las de tracción, de efectos térmicos. En los puntos evaluados en este trabajo, los cuales corresponden a la línea central, la componente en la dirección  $x$  de la fuerza tangencial de corte es máxima y la componente en la dirección  $y$  es nula. Por otra parte, en la dirección  $y$ , actúa la fuerza de avance, la cual es siempre menor que la fuerza tangencial de corte [17]. Debido a esto, la deformación plástica local en la dirección  $x$  debe ser mayor a aquella correspondiente a la dirección  $y$ . Los niveles compresivos de las tensiones generadas por dicha deformación plástica local (efecto mecánico) se muestran en la mencionada Fig. 1 (b). Esta figura también muestra los niveles de las tensiones cuyo origen es térmico. En este caso, los niveles, que corresponden a tracción, deben ser menores (en valor absoluto) a sus homólogos mecánicos, ya que la resultante final debería ser compresiva. Además, se deberá cumplir con la siguiente expresión

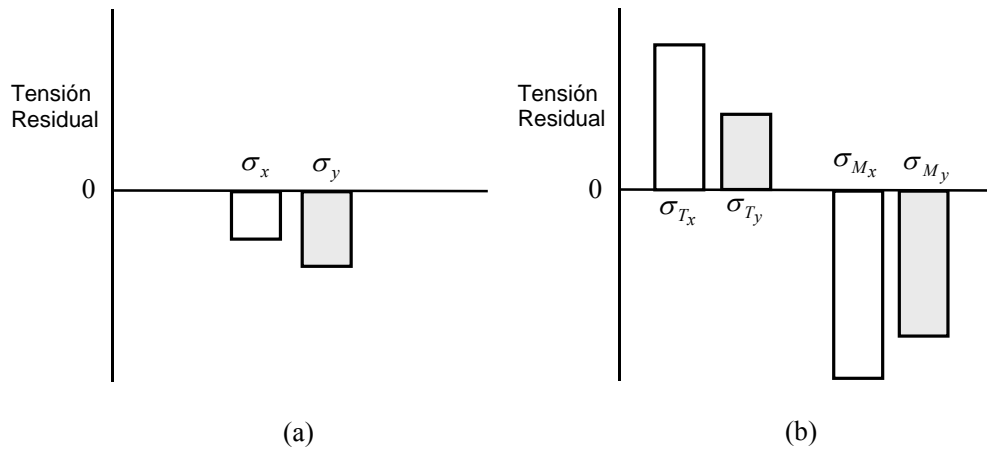
$$\sigma_{T_x} > \sigma_{T_y} \quad (3)$$

y también con

$$\Delta\sigma^T > \Delta\sigma^M \quad (4)$$

donde  $\sigma_{T_x}$  y  $\sigma_{T_y}$  son las componentes normales de la tensión residual generadas por efectos térmicos.

Por otra parte,  $\Delta\sigma^T$  y  $\Delta\sigma^M$  corresponden a las diferencias entre los niveles de las componentes normales, generadas por efectos térmicos y mecánicos, respectivamente. Este análisis, basado en la Fig. 4, predice un efecto de orientación en cuanto a la energía térmica que se deriva desde la zona primaria de corte a la superficie generada, ya que el nivel de ambas componentes normales cuyo origen es térmico no es el mismo. Cabe destacar que este efecto de orientación no fue contemplado en el mencionado trabajo de Jacobus *et al.* [16] debido al hecho de que el mencionado efecto térmico es resultado de un campo escalar de temperaturas. En este trabajo, el efecto de orientación, en principio generaría una muy pequeña diferencia de flujo calórico, y podría ser debido a un efecto dinámico causado por el movimiento del filo de corte secundario [17]. Es importante destacar que, la dirección del movimiento de dicho filo secundario, al pasar por los puntos evaluados, es paralela al eje  $x$ .



**Figura 4.** Niveles relativos correspondientes a las componentes normales: (a) globales y (b) térmicos y mecánicos.

#### 4. CONCLUSIONES

El método de micro-indentas utilizado en este trabajo permitió la determinación de tensiones residuales compresivas muy reducidas, las cuales fueron generadas vía fresado frontal en muestras de aleación de aluminio AA 7075 – T6. Estas tensiones fueron determinadas a lo largo del eje de simetría paralelo a la dirección de avance. Dos protocolos de mecanizado fueron evaluados a partir del uso de máquinas herramientas (controladas numéricamente) diferentes. Los valores obtenidos para la sustracción de componentes normales de la tensión residual resultaron independientes tanto de la máquina herramienta utilizada como de la combinación de parámetros de proceso seleccionada. Este hecho indicaría que la diferencia de daño plástico local y cantidad de calor conducido a la superficie generada, que se establece para direcciones ortogonales, permanece invariable. Además, los incrementos de las mencionadas componentes normales, al variar uno de los parámetros de proceso, resultaron ser similares en cada uno de los protocolos, lo cual indica que la sensibilidad ante dicha modificación es la misma para ambas direcciones evaluadas. Finalmente, el hecho de que, para todos los casos evaluados, la componente  $\sigma_y$  de la tensión residual resulte siempre mayor (en valor absoluto) que la componente  $\sigma_x$  permite predecir un efecto de orientación en cuanto al flujo calórico que se deriva a la superficie que se está generando, lo

cual podría ser causado por el movimiento del filo de corte secundario, el cual tiene una dirección específica al atravesar el segmento donde se encuentran los puntos evaluados.

## REFERENCIAS

1. E. Brinksmeier, J.T. Cammett, W. Konig, P. Leskovar, J. Peters and H.K. Tonshoff, "Residual stresses — measurement and causes in machining processes"; *Annals of the CIRP*, Vol. 31 (1982), p. 491–510.
2. A. M. Abrão, J. L. Silva Ribeiro and J. Paulo Davim, "Surface integrity," In: J. Paulo Davim, Ed., *Machining of Hard Materials*, Springer-Verlag, London, 2011, p. 115-141.
3. R. M Saoubi, J.C. Outeiro, B. Changeux, J.L. Lebrun, J.L. and A. Morão Dias, "Residual stress analysis in orthogonal machining of standard and resulfurized AISI 316 steels"; *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 96 (1999), p. 225-233.
4. J. Hua, R. Shivpuri, X. Cheng, V. Bedekar, Y. Matsumoto, F. Hashimoto and T. R. Watkins, "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"; *Materials Science and Engineering A*, Vol. 394 (2005), p. 238-248.
5. W. Bouzid Saï, N. Ben Salah and L. Lebrun, "Influence of machining by finishing milling on surface characteristics"; *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 4 (2001), p. 443-450.
6. E. Capello, "Residual stresses in turning. Part I: Influence of process parameters"; *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 160 (2005), p. 221-228.
7. J.G. Swadener, B. Taljat, G.M. Pharr, "Measurement of residual stress by load and depth sensing indentation with spherical indenters"; *Journal of Materials Research*, Vol. 16 (2001), p. 2091-2102.
8. M Zhao, X Chen, J Yan *et al.* "Determination of uniaxial residual stress and mechanical properties by instrumented indentation"; *Acta Materialia*, Vol. 54 (2006), p. 2823-2832.
9. J. E. Wyatt and J. T. Berry, "A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes"; *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 171 (2006), p. 132-140.
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"; *Experimental Mechanics*, Vol. 50 (2010), p. 205-215.
11. F. V. Díaz and C. A. Mammana, "Study of residual stresses in conventional and high-speed milling," In: L. A. Filipovic, Ed., *Milling: Operations, Applications and Industrial Effects*, Nova Science Publishers, Inc., New York, 2012, p. 127-155.
12. F.V. Díaz, C.A. Mammana and A.P.M. Guidobono, "Evaluation of Residual Stresses Induced by High Speed Milling Using an Indentation Method"; *Modern Mechanical Engineering*, Vol. 2 (2012), p. 143-150.
13. M.A. Curtis and F.T. Farago, "Handbook of Dimensional Measurement"; 2007, Industrial Press Inc., New York.
14. J.M. Gere, "Mechanics of Materials"; 2001, Brooks/Cole, Pacific Grove, CA.
15. B. R. Sridhar, G. Devananda, K. Ramachandra and R. Bhat, "Effect of machining parameters and heat treatment on the residual stress distribution in titanium alloy IMI-834"; *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 139 (2003), p. 628–634.
16. K. Jacobus, S. G. Kapoor and R. E. DeVor, "Experimentation on the residual stresses generated by endmilling"; *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 123 (2001), p. 748-753.
17. E.M. Trent, "Metal Cutting"; 1991, Butterworth/Heinemann, London.