

DETERMINACION DE TENSIONES RESIDUALES INDUCIDAS POR MAQUINADO DE ALTA VELOCIDAD USANDO UN METODO DE PARES DE INDENTAS

**F.V. Díaz⁽¹⁾, R.E. Bolmaro⁽²⁾, A. Guidobono⁽³⁾
y C. Mammana⁽¹⁾**

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

(2) Grupo de Materia Condensada II – Instituto de Física Rosario
CONICET - Universidad Nacional de Rosario
Bv. 27 de Febrero 210 bis (2000) Rosario, Argentina.

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

E-mail (autor responsable): felipe.diaz@fra.utn.edu.ar
E-mail (alternativo): bolmaro@ifir.edu.ar

Palabras claves: Tensiones residuales; Maquinado de alta velocidad; Integridad superficial.

RESUMEN

Un método de pares de indentas es usado para determinar las distribuciones de tensiones residuales generadas en muestras de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6 fresadas a alta velocidad. El método está basado en la medición de la distancia que media entre dos indentas colineales, antes y después de un tratamiento térmico. Para llevar a cabo el proceso de medición de los desplazamientos residuales, este método no necesita un equipamiento específico sino que solo requiere el uso de una máquina de medir universal. Para este trabajo, un dispositivo de indentación fue incorporado a dicha máquina de medir a fin de reducir el error absoluto de medición. A partir de la introducción de indentas longitudinales de gran rectitud fue posible medir dichos desplazamientos residuales con un error absoluto de $\pm 0.3 \text{ }\mu\text{m}$. Cabe destacar que el mencionado dispositivo de indentación puede ser acoplado a un sensor electrónico que posibilita ajustar con gran precisión la profundidad de la indenta.

La geometría de la herramienta y los parámetros de corte fueron seleccionados para evaluar la sensibilidad del método. Los ensayos de maquinado de alta velocidad fueron llevados a cabo en una máquina fresadora controlada numéricamente, usando una fresa frontal de 63 mm de diámetro. Los insertos que incorpora dicha fresa fueron de carburo de tungsteno sin recubrimiento a los efectos de favorecer los filos de corte.

Sobre la superficie de cada muestra maquinada se realizó una distribución de indentas longitudinales que permitió la determinación de las tensiones residuales en diferentes puntos pertenecientes a los ejes de simetría de dicha superficie. La medición de las distancias entre pares de indentas fue realizada antes y después de un tratamiento térmico de recocido, con parámetros de temperatura y tiempo de 573 K y 80 minutos, respectivamente.

Las tensiones residuales obtenidas muestran patrones específicos en ambos ejes de simetría. A lo largo del eje paralelo a la dirección del movimiento de avance, las componentes de la tensión residual evaluadas muestran una distribución lineal, de reducida pendiente. En cambio, a lo largo del eje normal a dicha dirección de avance, la distribución es en forma de V. Estos patrones permiten inferir que los mecanismos que operan para generar dichas tensiones son, a la vez, muy sensibles a las componentes ortogonales de la velocidad de corte, y poco sensibles tanto a la velocidad del movimiento de avance como a las características mecánicas de las aleaciones evaluadas.

1. INTRODUCCION

El proceso de fabricación denominado maquinado es uno de los procesos más importantes debido a que incorpora, en los materiales que transforma, un alto valor agregado. Los costos que genera este proceso pueden ser reducidos a través del incremento de los valores que alcanzan algunos de los parámetros utilizados tales como la velocidad de avance y la velocidad de corte. Si el incremento mencionado es significativo, el maquinado convencional se transforma en maquinado de alta velocidad (MAV) [1-3]. Esta clase de maquinado ofrece algunas ventajas como ser: 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 a alta velocidad pueden fallar en forma prematura debido al campo de tensiones residuales introducido en la superficie [4,5].

Recientemente, un método basado en la modificación de la distancia entre pares de indentas fue desarrollado a fin de determinar tensiones residuales en componentes mecánicas [6]. El cambio de la mencionada distancia ocurre cuando las tensiones son relajadas a través de un tratamiento térmico. Este método ofrece la gran ventaja de evitar el uso de equipamiento específico, ya que, para la medición de las distancias entre indentas, solo se necesita un microdurómetro y una máquina de medir universal (MMU), los cuales forman parte, en muchos talleres, del equipamiento necesario para el control de calidad de las componentes producidas [7].

El propósito de este trabajo es demostrar la viabilidad y sensibilidad de un método de pares de indentas modificado para reducir el error absoluto atinente a la medición de los desplazamientos residuales y, también, presentar un análisis de la relación entre los perfiles de tensiones residuales generados por MAV y los parámetros de corte utilizados. Un dispositivo indentador fue incorporado a la MMU, el cual permite introducir indentas longitudinales de gran rectitud. Este indentador es acoplado a un sensor electrónico que permite ajustar con una alta precisión la profundidad de la indenta. Los ensayos de MAV fueron realizados en una máquina fresadora controlada numéricamente usando probetas de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6. Las tensiones residuales fueron calculadas a partir de los desplazamientos medidos usando un modelo de tensión plana [8]. Finalmente, la sensibilidad del método fue evaluada usando una

combinación de parámetros de MAV que generaron tensiones residuales de valores bajos.

2. DETERMINACION DE TENSIONES RESIDUALES

El método usado en este trabajo se detalla en la Ref. 6. Brevemente, este consiste en realizar una distribución de indentas sobre la superficie a evaluar usando un microdurómetro, para después medir, antes y después de un tratamiento térmico, las distancias entre pares de indentas usando una MMU. En este trabajo, la distribución de indentas es introducida usando un dispositivo mecánico que se monta a la MMU. La Fig. 1 muestra una vista frontal de dicho dispositivo. Este dispositivo permite regular, con alta precisión, la profundidad a la que se realiza la indenta. Usando este dispositivo es posible introducir indentas longitudinales, las cuales posibilitan la reducción de la discrepancia de reposicionamiento de las muestras a posteriori del tratamiento térmico.

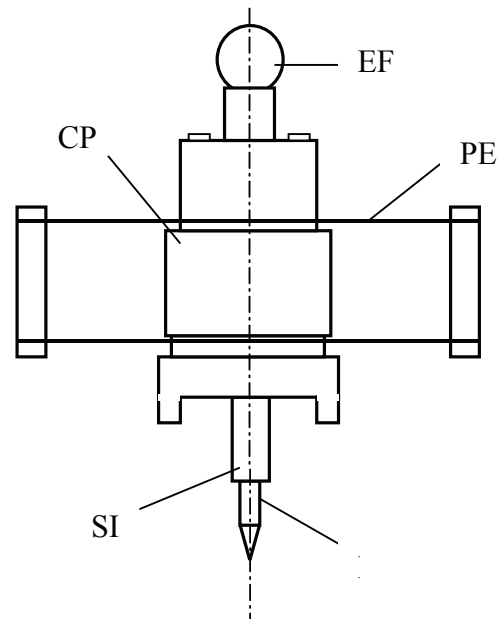


Figura 1. Vista frontal del dispositivo mecánico: (EF) esfera de fijación; (CP) cuerpo principal; (PE) paralelogramo elástico; (I) indentador; (SI) soporte del indentador

A partir de una distribución de indentas longitudinales como muestra la Fig. 2, es posible obtener los desplazamientos residuales

$$u = X_a - X_d \quad (1)$$

$$v = Y_a - Y_d \quad (2)$$

donde X_a y X_d son las distancias entre indentas A y B, antes y después de la liberación de tensiones,

respectivamente. Y_a e Y_d corresponden a las distancias entre indentas C y D, también, antes y después de la liberación de tensiones, respectivamente. A partir de estos desplazamientos es posible obtener las deformaciones residuales

$$\underline{u}_x = u / X_d \quad (3)$$

$$\underline{v}_y = v / Y_d \quad (4)$$

Finalmente, las tensiones residuales generadas por MAV pueden ser obtenidas a partir de ambas deformaciones. Asumiendo un estado plano de tensiones en la superficie de la probeta [8], las tensiones residuales para un material elástico lineal, homogéneo e isotrópico pueden ser expresadas como

$$\underline{\sigma}_x = (\underline{u}_x + \underline{v}_y) E / (1 - \underline{\nu}) \quad (5)$$

$$\underline{\sigma}_y = (\underline{v}_y + \underline{u}_x) E / (1 - \underline{\nu}) \quad (6)$$

donde E es el módulo de elasticidad longitudinal y $\underline{\nu}$ la razón de Poisson del material evaluado.

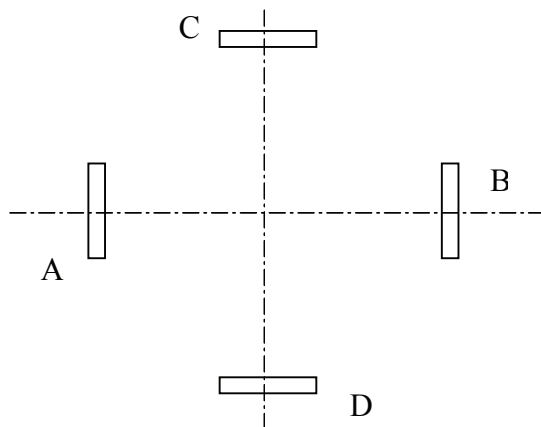


Figura 2. Distribución de indentas longitudinales para medición ortogonal.

3. ANALISIS DE ERRORES

Un trabajo experimental previo fue realizado a fin de evaluar los errores generados al medir distancias entre indentas tanto piramidales, introducidas con un indentador Vickers, como longitudinales, introducidas con el indentador que muestra la Fig. 1. Sobre la superficie de diferentes muestras maquinadas se introdujeron distribuciones de los dos tipos de indentas, con la disposición que se muestra en la Fig. 2. La distancia nominal entre pares de indentas fue de 28

mm. Tomando 10 lecturas para cada una de las distancias, el error absoluto máximo estimado fue de $\pm 0.3 \mu\text{m}$ para la distancia entre indentas piramidales y de $\pm 0.2 \mu\text{m}$ para la distancia entre indentas longitudinales.

Si bien el error atinente a los desplazamientos, al formularse estos como la resta entre dos distancias, debería calcularse a partir del error estimado para cada una de las distancias, el procedimiento de medición que se propone en este trabajo requiere de una gran precisión en el reposicionamiento de la muestra después del tratamiento térmico. Por lo tanto, el error atinente a los desplazamientos debería tomar en cuenta, además, la discrepancia de reposicionamiento. Esta discrepancia, obtenida a partir de diferentes secuencias de reposición, con 10 lecturas para cada estado de muestra reposicionada, alcanzó el entorno de $\pm 1.2 \mu\text{m}$ para el caso de indentas piramidales y de $\pm 0.15 \mu\text{m}$ para el caso de indentas longitudinales. Esta importante diferencia responde a que, para la alineación final de la muestra reposicionada, los trazos rectos de las indentas longitudinales ofrecen menor dificultad que la geometría romboidal propia de las indentas piramidales.

La Tabla I muestra los errores estimados para los desplazamientos teniendo en cuenta la mencionada discrepancia. Esta tabla también muestra los errores atinentes a las deformaciones y tensiones, los cuales pueden estimarse a partir de los errores de las distancias entre indentas y de la discrepancia de reposicionamiento, usando la ecuación del error absoluto probable [9]. Como era de esperar, dicha tabla muestra que, para las deformaciones y tensiones, se mantiene la misma relación de 1:5 correspondiente a los errores de los desplazamientos.

Tabla I. Errores absolutos

Indentación	Error absoluto		
	$u, v (\mu\text{m})$	$\underline{u}_x, \underline{v}_y (\%)$	$\underline{\sigma}_x, \underline{\sigma}_y (\text{MPa})$
Longitudinal	± 0.3	± 0.001	± 0.9
Piramidal	± 1.5	± 0.005	± 4.5

4. METODOLOGIA

El trabajo experimental fue extendido a dos productos laminados: las aleaciones de aluminio AA 6082-T6 (A6) y AA 7075-T6 (A7), las cuales pueden ser consideradas de características mecánicas media y alta, respectivamente. La composición química de dichas aleaciones y sus características mecánicas se muestran en las Tablas II y III, respectivamente.

Tabla II. Composición química de los materiales investigados

Composición química (% peso)								
Aleación	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn
A6	Base	0.2	0.9	0.15	0.5	0.9	0.22	0.6
A7	Base	5.6	2.52	1.72	0.32	0.2	0.17	0.16

Tabla III. Propiedades mecánicas de los materiales investigados

Propiedades Mecánicas				
Aleación	Res. Tracción R_m (MPa)	Lim. Elástico $R_{f0.2}$ (MPa)	Elongación A (%)	Dureza HV0.5
A6	340	310	11	108
A7	570	505	11	186

Las dimensiones de las probetas ensayadas fueron de 110 x 40 x 4 mm. Previamente a los ensayos de maquinado, las mismas fueron tratadas térmicamente a fin de eliminar las tensiones residuales generadas en la operación de laminado. La temperatura y tiempo correspondientes a la operación de recocido fueron de 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) que se incorporaron a dicha herramienta fueron de carburo de tungsteno. La Tabla IV muestra las condiciones de ensayo utilizadas en este trabajo. Los ensayos fueron realizados en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente (Clever CMM-100). La Fig. 3 muestra una vista superior de la posición relativa de la muestra ensayada con respecto a la herramienta de corte.

Tabla IV. Parámetros de maquinado

Vel. de corte V_c (m/min)	Avance f (mm/rev)	Profundidad d (mm)
1000	0.1-0.2	1.00-1.25

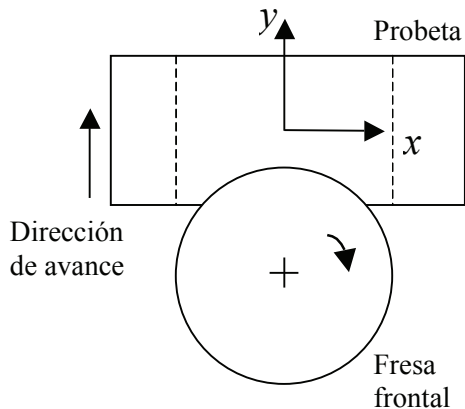
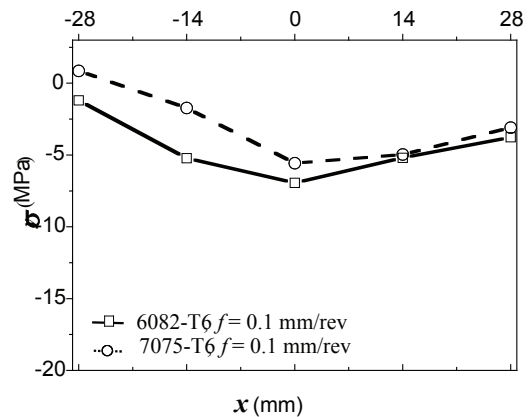


Figura 3. Vista superior del sistema probeta-herramienta.

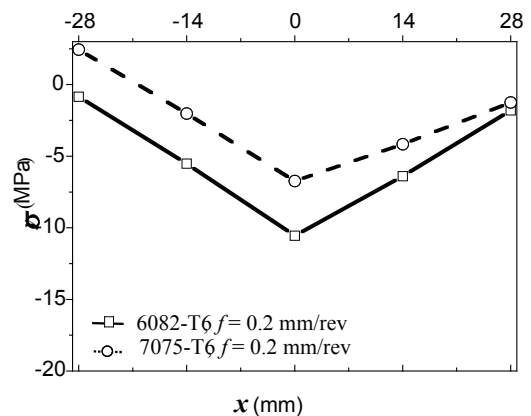
Sobre la superficie maquinada se realizó una distribución de indentas que permitió calcular las tensiones en varios puntos pertenecientes a ambos ejes de simetría ($x = 0$ e $y = 0$ en la Fig. 3). La medición de las distancias entre pares de indentas, a posteriori del maquinado (medición 1), se llevó a cabo usando una máquina de medir GSIP MU-314. El tratamiento de recocido, realizado a fin de liberar las tensiones residuales generadas por el maquinado, también se llevó a cabo por el término de 80 minutos, a una temperatura de 573 K. Finalmente se procedió a medir nuevamente las distancias entre indentas. En este último caso (medición 2) dichas distancias corresponden a la superficie ya relajada. Ambas mediciones (1 y 2), fueron realizadas a 20 °C.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

La Fig. 4 muestra la distribución de la componente de la tensión residual σ_y para diferentes puntos del eje $y = 0$. A pesar de que dicha componente



(a)

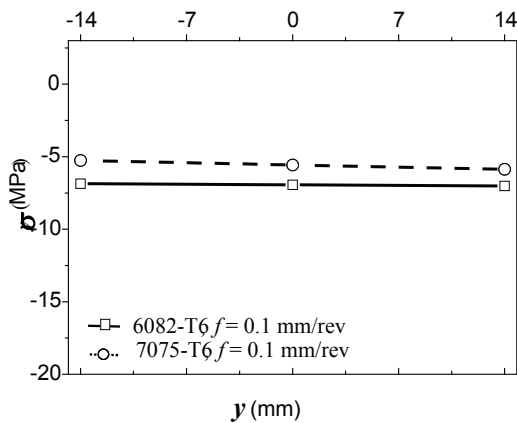


(b)

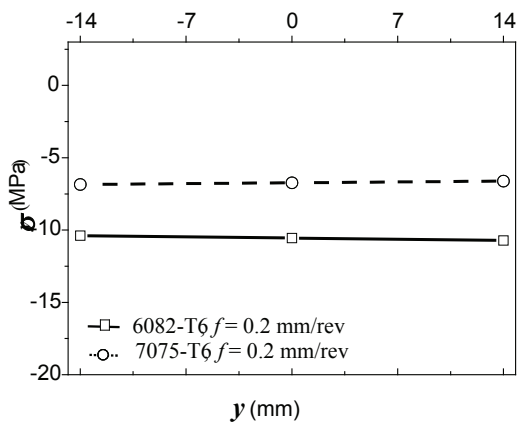
Figura 4. Distribución de la componente σ_y a lo largo del eje $y = 0$ ($V_c = 1000$ m/min, $d = 1$ mm y (a) $f = 0.1$ mm/rev, (b) $f = 0.2$ mm/rev).

muestra valores muy bajos, la técnica usada puede detectar las pequeñas diferencias entre ambas aleaciones evaluadas. La Fig. 4 (a) muestra el mismo patrón para ambas aleaciones. Las tensiones mínimas ocurren en el baricentro del eje y las tensiones máximas en los extremos del mismo. La Fig. 4 (b) muestra como son los perfiles de la misma componente cuando la velocidad de avance se duplica. Se puede notar que esta modificación en el avance no genera cambios en el patrón de tensiones.

La Fig. 5 (a) muestra como varía la misma componente σ_y a lo largo del eje $x = 0$ (eje vertical de simetría en la Fig. 3). Para ambos materiales, la distribución es casi constante. Además, la diferencia entre ambos niveles es muy reducida. La Fig. 5 (b) muestra los valores que alcanza dicha componente cuando el avance pasa a ser $f = 0.2$



(a)

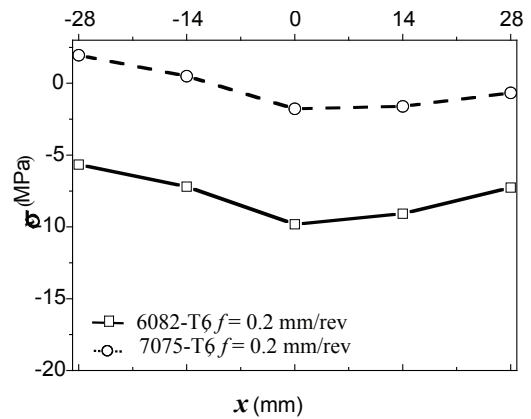


(b)

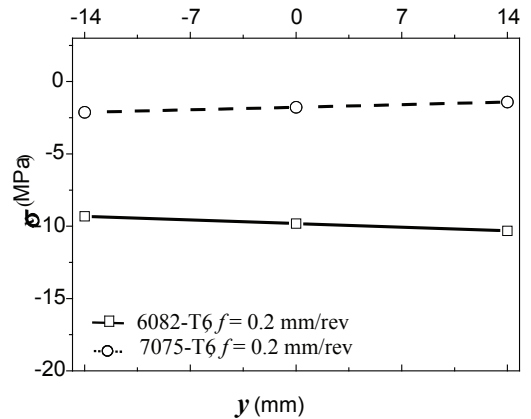
Figura 5. Distribución de la componente σ_y a lo largo del eje $x = 0$ ($V_c = 1000$ m/min, $d = 1$ mm y (a) $f = 0.1$ mm/rev, (b) $f = 0.2$ mm/rev).

mm/rev. Para este caso, las distribuciones también son similares a aquellas que se generan con la velocidad de avance menor. La única diferencia consiste en los niveles de tensión alcanzados.

La Fig. 6 (a) muestra como se distribuye la componente de la tensión residual σ_x a lo largo del eje $y = 0$. Si bien las distribuciones son similares a las mostradas en la Fig. 4, las pendientes desde el baricentro hacia los extremos son más pequeñas. Se puede notar que las formas de ambas distribuciones muestran una gran similitud. La Fig. 6 (b) muestra como dicha componente se distribuye a lo largo del eje de simetría $x = 0$. Ambos materiales muestran una distribución lineal, con pendiente reducida. Al igual que en las figuras anteriores, la aleación A6 muestra valores más compresivos.



(a)



(b)

Figura 6. Distribución de la componente σ_x a lo largo de los ejes (a) $y = 0$ y (b) $x = 0$ ($V_c = 1000$ m/min, $d = 1$ mm y $f = 0.2$ mm/rev).

Los resultados obtenidos muestran patrones similares para ambas aleaciones, los cuales no dependen de la velocidad de avance adoptada. Ambas componentes de la tensión residual ($\sigma_{x,y}$) muestran una distribución con forma de V a lo largo del eje normal a la dirección de avance, y una distribución lineal de pequeña pendiente a lo largo del eje paralelo a dicha dirección de avance. Estas distribuciones estarían estrechamente vinculadas con los valores que adoptan las componentes de la velocidad de corte (V_{cx}, V_{cy}) en cada uno de los puntos evaluados en los ejes de simetría. Lo mencionado se basa en que la componente V_{cx} es variable pero simétrica con respecto al eje $x = 0$ y constante a lo largo de dicho eje, además, la otra componente, V_{cy} , es variable pero simétrica en módulo con respecto al eje $x = 0$ y nula a lo largo de dicho eje.

Lo anterior sugiere la existencia de un mecanismo común para la generación de tensiones residuales en los dos materiales investigados. Se debe notar que la literatura cuenta con muy pocos trabajos que muestren evidencia de perfiles de tensiones similares para diferentes aleaciones maquinadas. En un estudio extendido a tres aceros torneados, Capello [10] concluyó que las tensiones residuales introducidas sobre la superficie maquinada no dependen de las propiedades del material. En el presente trabajo, el análisis realizado a partir de las tensiones obtenidas en ambos ejes de simetría permite inferir una fuerte influencia de las componentes de la velocidad de corte y, además, que tanto el tipo de aleación como la velocidad de avance afectan el nivel de tensión alcanzado pero no la forma de su distribución.

6. CONCLUSIONES

Un método de pares de indentas ha sido optimizado para determinar tensiones residuales generadas por MAV en muestras de aleaciones de aluminio de características mecánicas media y alta. La incorporación de un dispositivo indentador a la MMU posibilitó tanto reducir el error absoluto de medición como prescindir del uso de un microdurómetro. Debido a esto último, la medición completa pudo llevarse a cabo, usando este método optimizado, sobre la mesa de la MMU.

Para evaluar la sensibilidad de dicho método, los parámetros de MAV fueron seleccionados de manera de generar campos de tensiones residuales de valores bajos. Las distribuciones de tensiones obtenidas muestran una fuerte influencia de las componentes ortogonales de la velocidad de corte. Estas distribuciones también muestran que las características mecánicas de ambas aleaciones y la

velocidad de avance adoptada tendrían una escasa participación en los mecanismos que generan dichas tensiones.

REFERENCIAS

- [1] Mantle, A.L. and Aspinwall, D.K., J. Mater. Process. Technol., 118 (2001) 143-150.
- [2] Cus, F., Zuperi, U. and Gecevaska, V., J. Ach. Mater. Manuf. Eng., 20 (2007) 419-422.
- [3] Kauppinen, V., 4th International DAM Conference, Tallin-Estonia, 2004, 131-134.
- [4] Rowlands, R.E., Residual stresses, in: Handbook on Experimental Mechanics, Prentice-Hall, New Jersey, 1987, pág. 768.
- [5] Dieter, G.E., Mechanics of Metallurgy, third ed., McGraw-Hill, New York, 1986.
- [6] Wyatt, J.E. and Berry, J.T., J. Mater. Process. Technol., 171 (2006) 132-140.
- [7] Wyatt, J.E., Berry, J.T. and Williams, A.R., J. Mater. Process. Technol., 191 (2007) 170-173.
- [8] Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N., Theory of Elasticity, 3^a ed. McGraw-Hill, New York, 1970.
- [9] Bevington, P.R. and Robinson, D.K., Data reduction and error analysis for the physical sciences, 3^a ed. McGraw-Hill, New York, 2002.
- [10] Capello, E., J. Mater. Process. Technol. 160 (2005) 221-228.