

Análisis de Tensiones Residuales Generadas por Mecanizado de Alta Velocidad

Resumen: Durante el mecanizado de alta velocidad de una componente mecánica se introducen, inevitablemente, tensiones residuales. Este tipo de tensiones puede generar efectos adversos tanto en la geometría como la vida útil de la componente maquinada. A partir de un método de pares de indentas y sobre muestras de diferentes tipos de aleaciones de aluminio (AA 6082-T6 y AA 7075-T6), fue posible estudiar el comportamiento de dichas muestras frente a distintas combinaciones de parámetros de alta velocidad. Finalmente, los resultados obtenidos permitieron evaluar los diferentes estados de tensiones introducidos en cada uno de los materiales y, a su vez, las posibles causas generadoras de las mismas.

Palabras Claves: Tensiones residuales; Mecanizado; Aluminio; Método de indentas.

Abstract: During the high-speed machining of a mechanical component, residual stresses are inevitably introduced. These stresses can generate adverse effects on both the machined component geometry and useful life. In this work, from a micro-indent method, it was possible to study the behavior of samples of aluminum alloys AA 6082-T6 and AA 7075-T6, which were subjected to different combinations of high-speed parameters. Finally, the obtained results allowed to evaluate the different stress states introduced in each of the materials and, besides, the possible causes generating the mentioned stresses.

Keywords: Residual stresses; Machining; Aluminum; Indent method.

Sebastián Vottero

Departamento de Ingeniería Electromecánica, Facultad Regional Rafaela (Acuña 49, Rafaela), UTN.

Mail:seba_vottero@hotmail.com

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección del Dr. Felipe Díaz, en el marco del proyecto "Estudio de tensiones residuales inducidas por mecanizado" (2015 - 2016).

INTRODUCCIÓN

Frente a la inminente búsqueda por aumentar la productividad, el mecanizado de alta velocidad (MAV) (Schulz 1996) ha sido foco de numerosos avances con el fin de lograr este objetivo. Ante la inserción y desarrollo de nuevas máquinas-herramientas, el aumento inherente a los parámetros de MAV ha permitido, en la industria, obtener mejores resultados en tiempos más acotados. Esto, a su vez, ha generado la necesidad de disponer de materiales más resistentes y capaces de soportar condiciones extremas de mecanizado.

Las tensiones residuales (Brinksmeier 1982) son objeto de estudio debido a que no solo son causadas por la deformación plástica que genera, en el MAV, la interacción de la herramienta con el material, sino también por el calor conducido entre la zona primaria de deformación (Abrão et al. 2011) y la superficie que se va generando. Es importante destacar que estas tensiones son función de las propiedades del material mecanizado, de la geometría, diseño y estado de la herramienta de corte, y además, de las condiciones de refrigeración.

En este trabajo, los ensayos de MAV consistieron en operaciones de fresado frontal con corte central y fueron llevados a cabo en una máquina fresadora vertical controlada numéricamente. Este tipo de fresado posibilita distinguir, en la superficie generada, dos zonas adyacentes denominadas de corte ascendente y descendente. Dos profundidades de corte fueron seleccionadas con el fin de evaluar el compor-

tamiento de las tensiones, ya sea entre distintas zonas de un mismo material como así también entre diferentes materiales.

El propósito de esta investigación fue evaluar, a partir de dichos ensayos de MAV, el comportamiento de las aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6 frente a condiciones severas de corte. A partir de un análisis previo (Mammana et al. 2010), se llevo a cabo un estudio sobre diámetros de círculos de Mohr e incrementos de tensiones entre las dos zonas desarrolladas, los cuales no presentan antecedentes en la literatura. El conjunto de observaciones posibilitó detectar que frente a un aumento en la profundidad de corte, dichas aleaciones presentan comportamientos diferentes -y hasta opuestos- en cuanto a los tensores, incrementos y diámetros de tensiones generados por MAV. Finalmente, este trabajo propone un análisis exhaustivo de las causas que generan dichos comportamientos.

METODOLOGÍA

Como se menciona más arriba, el presente trabajo se llevó a cabo a partir de muestras previamente laminadas de aleaciones de aluminio AA 6082-T6 y AA 7075-T6. Estas aleaciones pueden ser consideradas de características mecánicas media y alta, respectivamente. La composición química de las mismas, junto a sus características mecánicas se muestra en la Tabla I.

Aleación	Composición química (% peso)								Propiedades Mecánicas			
	Al	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Mn	Res. Tracción σ_u (MPa)	Lim. Elástico σ_y (MPa)	Elongación A (%)	Dureza HV0.5
AA 6082-T6	Base	0.2	0.9	0.15	0.5	0.9	0.22	0.6	340	310	11	108
AA 7075-T6	Base	5.6	2.52	1.72	0.32	0.2	0.17	0.16	570	505	11	186

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

Las dimensiones de las muestras evaluadas fueron de 110 mm x 40 mm x 4 mm. Previamente a los ensayos de fresado, dichas muestras fueron tratadas térmicamente con el fin de eliminar las tensiones residuales generadas en la conformación vía laminado. La temperatura y tiempo correspondiente a dicho tratamiento fueron de 300 °C y 80 minutos, respectivamente. Para los mencionados ensayos de MAV se usó una fresa frontal auto-balanceada de 63 mm de diámetro, la cual incorpora cinco insertos (Palbit SEHT 1204 AFFN-AL SM10) de carburo de tungsteno. Cabe destacar que los insertos fueron diseñados especialmente para mecanizar aleaciones de aluminio de alta resistencia. En la Tabla II se detalla tanto la geometría de estos insertos como los parámetros de MAV seleccionados para este trabajo. Los ensayos fueron realizados en una maquina fresadora vertical controlada numéricamente (Clever CMM-100). Una vista superior de la posición relativa de la muestra ensayada con respecto a la herramienta de corte es mostrada en la Fig. 1. En dicha figura es posible observar la ubicación de los puntos A y B, los cuales se hallan en los baricentros de las zonas de corte ascendente ($x > 0, y$) y descendente ($x < 0, y$).

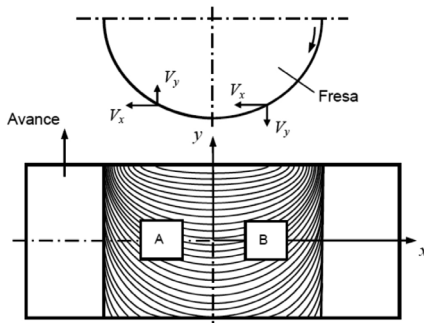


Fig. 1: Sistema fresa frontal-muestra.

El procedimiento de medición seleccionado corresponde a una técnica de indentas, cuyos detalles pueden ser consultados en estudios previos (Díaz et al. 2010, Díaz y Mammana 2012). 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 (Curtis y Farago 2007). Cabe destacar que estas máquinas son muy versátiles, posibilitando la realización de diversos tipos de mediciones en componentes mecánicas, incluyendo la determinación de coordenadas ortogonales (x, y, z) en cualquier punto de las mismas a partir de la incorporación de un microscopio micrómetro en el cabezal principal de la máquina.

La Fig. 2 muestra el estado de tensiones residuales en el baricentro de la superficie generada (punto C). Para obtener las diferentes componentes de la tensión residual en cualquier punto de dicha superficie se deben introducir 4 micro-indentas. Cada una de estas corresponderá a un vértice de un cuadrado imaginario cuyo baricentro es el punto a evaluar (Díaz y Mammana 2012). En este trabajo, la introducción de dichas micro-indentas fue realizada empleando un micro-durómetro Shimadzu HMV-2. Como fuera mencionado previamente, a partir de la introducción de estas micro-indentas es posible medir, antes y después de un tratamiento de distensión (300 °C y 80 minutos), las coordenadas de las mismas usando una MMU.

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

Tabla 2: Geometría de la herramienta y parámetros de corte.

Luego, a través del procesamiento de estas coordenadas (Mammanna et al. 2010), es posible obtener las componentes de la deformación residual σ_x , σ_y y τ_{xy} , 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 (Gere 2004), las componentes de la tensión residual, para el caso de un material elástico lineal, homogéneo e isótropo puede ser expresadas como:

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \cdot \sin 2\theta \quad (1a)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cdot \cos 2\theta \quad (1b)$$

donde $\sigma_{x'}$ y $\tau_{x'y'}$, obtenidas a partir de σ_x , σ_y y τ_{xy} , son las componentes de la tensión residual correspondientes al sistema de referencia original y θ es el ángulo inherente a la dirección de evaluación con respecto al eje de referencia x (ver Fig. 2). Finalmente, el error inherente a este procedimiento pudo ser estimado en ± 0.9 MPa (Díaz et al. 2010). Es importante notar que las coordenadas de las mencionadas micro-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 resulta mayor al valor mencionado, el error de medición aumentará significativamente.

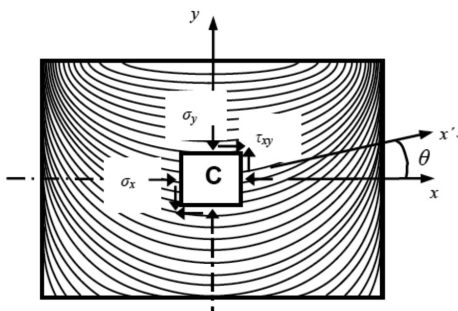


Fig. 2: Estado de tensiones residuales en el punto C.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cada material, para cada punto significativo de las superficies generadas, fue posible evaluar diferentes estados de tensiones introducidos por MAV en función de diferentes profundidades de corte. Como fuera mencionado anteriormente, dos puntos representativos se ubican en los baricentros de las zonas de corte ascendente y descendente.

Las Figs. 3 y 4 muestran las componentes normales de la tensión residual σ_p , σ_q , σ_x y σ_y representadas en función de los baricentros evaluados (Punto A y B), para cada material y profundidad de corte (1 mm y 1.25 mm). Cabe destacar que las direcciones principales (inherentes a σ_p y σ_q) son aquellas, ortogonales entre sí, donde las componentes normales alcanzan sus valores máximos y mínimos (Gere 2004).

Como se puede observar en dichas figuras, independientemente del material, baricentro y combinación de parámetros evaluados, las tensiones generadas son 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 (Brinksmeier 1982). Luego, la zona de deformación es descargada, lo cual conduce a un estado de tensión compresiva.

Además, las tensiones mayores en valor absoluto corresponden al baricentro de la zona de corte ascendente (Punto B) respecto a la zona de corte descendente (Punto A), independientemente del material y combinación de parámetros, lo cual sería producto de las interacciones entre el sentido de avance y la velocidad de corte de la herramienta (ver Fig. 1).

Con respecto a la influencia del material, las tensiones generadas en las muestras de aleación 6082-T6, resultan ser más compresivas que las obtenidas en las muestras de aleación 7075-T6. Esto ocurre, como se describe en trabajos anteriores (Mammana et al. 2010), debido a las diferentes fracciones de energía calórica transferidas desde la zona primaria de corte hacia la superficie maquinada, lo cual respondería a la mayor conductividad térmica para el caso del material 6082-T6.

Coincidentemente, en ambos materiales, frente a un aumento de la profundidad de corte, se obtienen tensiones más compresivas producto de un aumento de las fuerzas de corte para poder remover mayor cantidad de material, siendo los saltos mayores para el material 6082-T6. Además, si aislamos la tensiones principales más compresivas (σ_p) graficadas en la Fig. 3 (b), se puede observar como para las cuatro combinaciones posibles,

los modos de cambio al pasar de un baricentro a otro resultan ser muy similares, presentando un claro paralelismo entre cada una de los segmentos trazados. Este hecho estaría indicando un mismo comportamiento para ambos materiales cuando se analizan las tensiones máximas en las direcciones principales. Por otra parte, la Tabla III, muestra los incrementos de las tensiones generadas para cada combinación de material y parámetro d , al pasar del baricentro B al A. Entre todas las componentes evaluadas, además de las ya mencionadas, se incluye σ_m (tensión media), la cual representa el valor medio del tensor de tensiones generado por todas las direcciones y que, además, se ubica en el centro de los círculos de Mohr generados (Gere 2004). En dicha tabla, es posible observar que, para la componente principal σ_p , los cuatro incrementos se hallan dentro de un entorno muy pequeño (0.5 MPa).

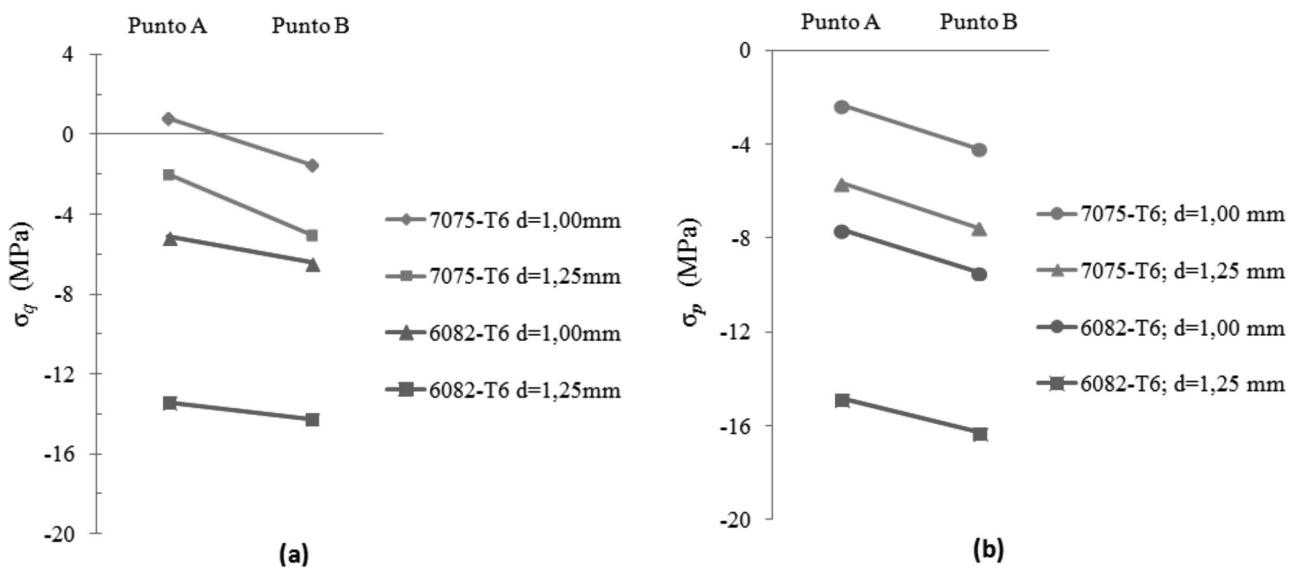


Fig. 3: Componentes (a) σ_y y (b) σ_p en función de los baricentros ascendente y descendente.

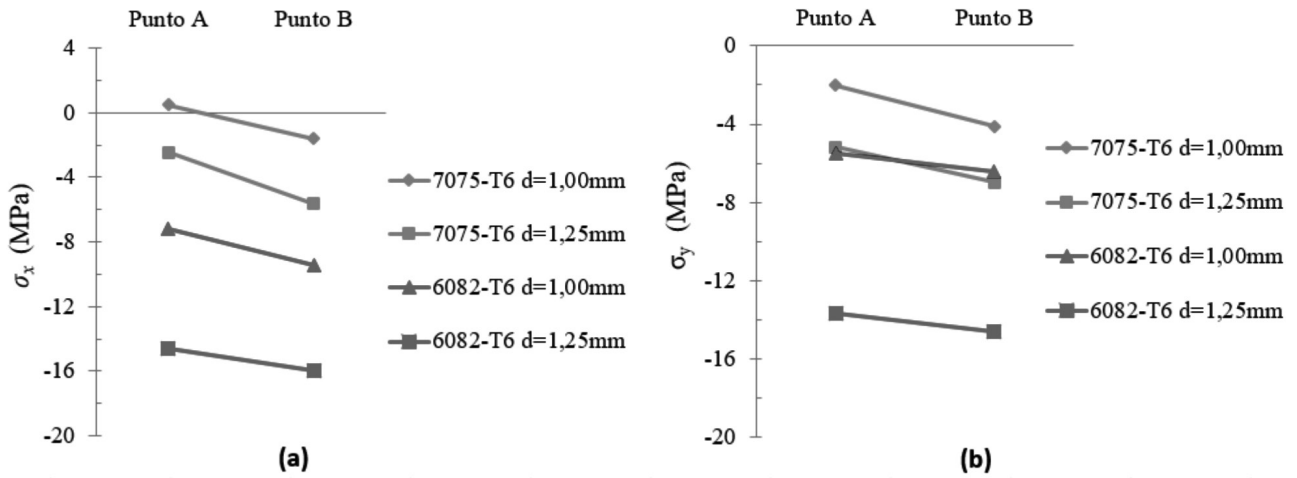


Fig. 4: Componentes (a) σ_x y (b) σ_y en función de los baricentros ascendente y descendente.

Por otra parte, si analizamos, en la mencionada tabla, los valores para la profundidad de corte de 1mm en cada una de las componentes normales, estos son similares para ambos materiales. Sin embargo, cuando la profundidad aumenta, ambos materiales presentan comportamientos opuestos. En el material 6082-T6, los incrementos de tensiones obtenidos entre un baricentro y otro disminuyen respecto a la profundidad anterior, lo que ocurre, presumiblemente, por un aumento mayor de efecto térmico (generador de tensiones de tracción) en el baricentro ascendente respecto al descendente (Díaz et al. 2013). Caso contrario ocurre en el material 7075-T6, en el cual, frente al aumento de la profundidad de corte, las varia-

ciones entre baricentros son mayores, lo que sería provocado por un mayor aumento de tensiones negativas generadas por efecto mecánico en el baricentro ascendente respecto al descendente.

Conjuntamente con los resultados anteriores, si analizamos los círculos de Mohr correspondientes a cada baricentro, estudiados en un trabajo previo (Mammana et al. 2010), se observará que cada material tiene un comportamiento particular para determinada combinación de variables.

La Tabla IV muestra los diámetros de los círculos de Mohr para las distintas combinaciones de baricentro, material y profundidad de corte. En dicha tabla se observa como al aumentar la variable d, el

Componentes normales	$\Delta\sigma$ (MPa)			
	7075-T6		6082-T6	
	d=1,00mm	d=1,25mm	d=1,00mm	d=1,25mm
σ_x	-2.1	-3.16	-2.23	-1.31
σ_y	-2.1	-1.8	-0.89	-0.94
σ_m	-2.1	-2.48	-2.06	-1.12
σ_p	-1.88	-1.92	-1.84	-1.43
σ_q	-2.32	-3.04	-1.28	-0.83

Tabla 3: Variación de σ entre los baricentros A y B.

diámetro de cada uno de los círculos disminuye para cada combinación de material y baricentro, excepto por el material 7075-T6 en la zona descendente. Cabe destacar que cuando disminuye el diámetro, disminuye la anisotropía de tensiones para el estado evaluado. El concepto de anisotropía hace referencia a los valores de todas las componentes en los diferentes ejes planares (Gere 2004).

		Punto A	Punto B
7075-T6	<i>d</i> =1,00mm	3,13	2,69
	<i>d</i> =1.25mm	3,64	2,53
6082-T6	<i>d</i> =1,00mm	2,50	3,06
	<i>d</i> =1.25mm	1,43	2,02

Tabla 4: Diámetros círculos de Mohr (MPa).

Este fenómeno podría estar indicando que frente a un aumento de profundidad de corte, la distribución de tensiones tiende agruparse en intervalos más pequeños presentando también un comportamiento direccional más homogéneo.

Esta última característica se puede ver más pronunciada en el material 6082-T6, que además presenta una disminución de incrementos de tensiones entre baricentros frente a un aumento de la profundidad de corte, como fuera mencionado previamente. Esto último permitiría afirmar que frente a situaciones de corte más severas el material 6082-T6 pareciera adaptarse mejor que el material 7075-T6, independientemente de la zona de corte evaluada.

CONCLUSIONES

El método de indentas utilizado en este trabajo permitió analizar las componentes de la tensión

residual en puntos representativos de las diferentes superficies mecanizadas. En todos los casos, las tensiones generadas por MAV resultaron ser compresivas y de valores reducidos. A partir del análisis de las diversas componentes evaluadas a diferentes profundidades de corte, fue posible detectar que las tensiones normales son ligeramente más altas en la zona de corte ascendente, lo cual respondería a la mayor deformación plástica que se genera cuando el sentido de la componente *V_y* de la velocidad de corte es opuesto al de la velocidad de avance. Por otra parte, los niveles alcanzados por el material 6082-T6 resultaron ser siempre más elevados (en valor absoluto) respecto a la aleación 7075-T6, lo cual sería consecuencia de pequeñas diferencias de flujo calórico durante el MAV debido a que el primero tiene mayor conductividad térmica.

A partir de los incrementos de tensiones observados entre cada baricentro, fue posible detectar comportamientos diferentes en cada material, observándose un comportamiento de las tensiones más homogéneo para el aluminio AA 6082-T6 cuando aumenta la profundidad de corte.

Complementando este análisis con el estudio de los tensores generados, se puede demostrar como la aleación mencionada, frente a situaciones de corte más severas, pareciera adaptarse mejor, presentando menor anisotropía y variación de tensiones a lo largo de las superficies generadas. Esto último respondería a una mejor combinación de propiedades mecánicas y térmicas, por parte del material 6082-T6, en relación a los parámetros de alta velocidad propuestos en este trabajo.

REFERENCIAS

- Abrão, A.M, Silva Ribeiro J.L, Paulo Davim, J. (2011). *Surface Integrity. En: Machining of Hard Materials. London: Springer – Verlag, p. 115-141.*
- Brinksmeier, E., Cammett, J.T, Koing, W., Leskovar, P, Peters, J., Tonshoff, H.K. (1982). *Residual stresses — Measurement and causes in machining processes. Annals of the CIRP, 31, 491-510.*
- Curtis, M.A., Farago, F.T. (2007). *Handbook of Dimensional Measurement. New York: Industrial Press Inc.*
- 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. Experimental Mechanics, 50, 205-215.*
- Díaz F.V., Mammana, C.A. (2012). *Study of residual stresses in conventional and high-speed milling. En: Milling: Operations, Applications and Industrial Effects, , New York: Nova Science Publishers, Inc., 127-155.*
- Díaz, F.V., Mammana, C.A., Guidobono, A.P.M. (2013). *Análisis de tensiones residuales en muestras de aleación de aluminio AA 7075-T6 mecanizadas a baja y alta velocidad. Congreso Internacional SAM/CONAMET 2013, Puerto Iguazú (Argentina).*
- Gere, J.M. (2004). *Mechanics of Materials. Belmont, CA: Brooks/Cole.*
- Mammana, C.A., Díaz, F.V., Guidobono, A.P.M. (2010). *Evaluación de tensiones residuales en muestras de aleaciones de aluminio mecanizadas a alta velocidad. Congreso Internacional CONAMET/SAM 2010, Viña del Mar (Chile).*
- 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. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2, 749-756.*
- Schulz, H. (1996). *High Speed Machining. Munich: Carl Hanser.*