
Análisis Preliminar de la Influencia del Proceso de Torneado en la vida a fatiga de la Aleación de Aluminio UNS A92024-T351

A. Gómez Parra⁽¹⁾, A. Sanz Lobera⁽²⁾, M. Marcos Bárcena⁽¹⁾

(1)Departamento de Ingeniería Mecánica y Diseño Industrial, Universidad de Cádiz, C/Chile s/n, 11003, Cádiz, 956015123, alvaro.gomez@uca.es.

(2)Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial, Universidad Politécnica de Madrid, Pza. del Cardenal Cisneros 3, 28040, Madrid

RESUMEN

Generalmente los elementos estructurales metálicos de las aeronaves se ubican en zonas de carga crítica, en la mayoría de los casos, estos elementos son conformados mediante procesos de mecanizado. La vida a fatiga de estos componentes es una propiedad dinámica muy importante que puede verse intensamente afectada por las condiciones superficiales producidas durante el proceso de mecanizado. En este trabajo se lleva a cabo un primer estudio de la influencia de los parámetros de corte en la resistencia a la fatiga de piezas torneadas de la aleación de aluminio aeronáutico UNS A92024-T351. Se ha prestado especial atención a la relación con el acabado superficial evaluado a partir de la rugosidad media aritmética.

Palabras clave: Mecanizado, Aleación de Aluminio, Rugosidad Superficial, Ra, Vida a Fatiga

ABSTRACT

Generally, metal structural elements of aircraft are placed in zones of critical load, in most cases, these elements are manufactured by machining processes. The fatigue life of these components is an important dynamic property that may be strongly affected by the surface condition produced during machining. In this paper an initial study of the influence of cutting parameters on fatigue strength of parts machined in aeronautical aluminum alloy UNS A92024-T351 is carried out. Special attention has been provided to the relationship with surface finish evaluated through the roughness average.

Keywords: Machining, Aluminum Alloy, Surface Roughness, Ra, Fatigue Life

1. Introducción

Independientemente de los vaivenes que experimente la continuamente cambiante situación económica internacional y de los diferentes modelos de sistemas de fabricación a los que se aproximen las empresas, el rendimiento de un proceso de fabricación viene condicionado por el rendimiento de cada uno de los subprocesos que intervienen en el mismo y de la óptima cohesión secuencial y paralela de cada uno de sus elementos y células. En ese sentido, se descende a hablar de rendimiento de un procesos de conformado, el cual, actualmente, no se evalúa sólo desde el punto de vista económico, sino que se complementa con factores relacionados con aspectos como el consumo energético o con el medioambiente. En los últimos años, el rendimiento del proceso se trata de vincular adicionalmente con el rendimiento del producto desde el punto de vista de la funcionalidad del mismo. Así, la influencia del proceso en el comportamiento funcional del producto obtenido debe ser tenida en cuenta, evaluada y estudiada a la hora de considerar satisfactorio el rendimiento global del proceso.

En el caso de los procesos de mecanizado, es necesario tener en cuenta, por una parte, que el desarrollo de una arranque de viruta modifica las características geométricas de las piezas, tanto a escala microscópica (microgeometría: rugosidad superficial) como macroscópica (macrogeometría: forma). Por otro lado, las fuerzas que se desarrollan en el sistema herramienta-pieza pueden provocar en la superficie de las piezas mecanizadas modificaciones de sus propiedades fisicoquímicas, disminuyendo la posible vida útil del producto final o haciendo necesarios postprocesados que enlentecen y encarecen el proceso global.

En el caso particular de la industria aeronáutica, algunas de las piezas mecanizadas se ubican en zonas del avión especialmente críticas y de alto compromiso por las cargas a las que se ven sometidas, en muchos casos de carácter cíclico, lo que obliga a que dichas piezas tengan un excelente comportamiento a fatiga.

En general, la vida a fatiga es una propiedad dinámica muy importante que puede verse fuertemente afectada por las condiciones superficiales producidas durante el proceso de conformado [1]. Así, en el caso de los procesos de mecanizado, la integridad superficial de los elementos trabajados -fuertemente ligada a las tensiones residuales desarrolladas durante el proceso y a la rugosidad superficial desarrollada- condiciona la nucleación superficial de microgrietas a fatiga que experimentan una progresión variable dependiendo del material y otras condiciones de trabajo [2,3].

Assumiendo las definiciones de Field y Kahles de Integridad Superficial (condiciones mejoradas o inherentes de una superficie producida mediante un proceso de mecanizado u otra operación de generación de superficie) [4,5] y la complementaria de P. Davim (conjunto propiedades, tanto superficiales como subsuperficiales, que afectan al rendimiento funcional de las superficies en servicio) [6] la Integridad Superficial requiere el estudio de parámetros y variables geométricas (macro y microgeométricos) y/o fisicoquímicas (microdureza, tensiones residuales, microestructura, microcomposición,...) y son estos parámetros los que pueden servir de base para analizar el rendimiento funcional a fatiga de elementos mecanizados.

Sin embargo, a pesar de todo lo comentado anteriormente, apenas existen en la bibliografía trabajos en los que se lleven a cabo estudios que combinen todas las características, variables y condiciones expuestas para determinar la influencia del mecanizado en el comportamiento a fatiga de un determinado material.

En este trabajo se lleva a cabo un primer estudio de la influencia de los parámetros de corte en la resistencia a la fatiga de piezas torneadas de la aleación de aluminio aeronáutico UNS A92024-T351. Se ha prestado especial atención a la relación con el acabado superficial evaluado a partir de la rugosidad media aritmética.

2. Experimental

Para la realización de este trabajo se llevaron a cabo ensayos de fatiga hasta rotura mediante la técnica de flexión rotativa, utilizando como material de partida una placa de aleación de aluminio UNS-A92024-T351, con composición en tanto por ciento en masa como la que se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Composición de la aleación de aluminio (% masa).

Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Al
4.00	1.50	0.60	0.50	0.50	0.25	0.15	0.10	Resto

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en la máquina de ensayos Instron modelo R.R Moore. Para ello se fabricaron probetas tomando como referencia la norma ISO/DIS 1143, Figura 1.

El proceso de fabricación de las probetas se llevó a cabo en varias etapas.

En primer lugar se procedió a dividir el material de partida con el objetivo de obtener paralelepípedos de iguales dimensiones. Para ello se utilizó una sierra de cinta. Posteriormente estas barras rectangulares fueron torneadas en diversas operaciones realizadas en torno convencional hasta llegar a obtener barras cilíndricas, Figura 2.

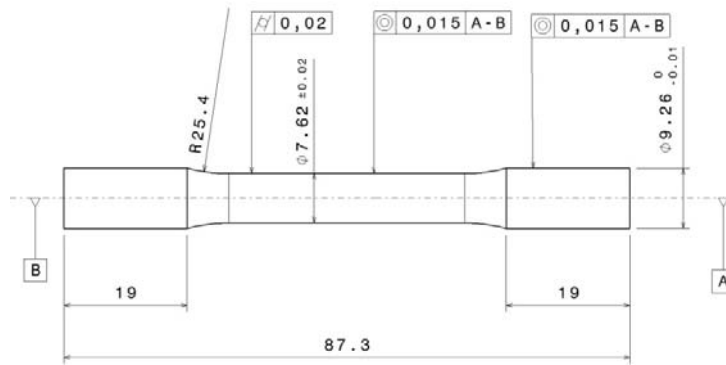


Figura 1: Diseño de probeta según referencias dictadas en Norma ISO/DIS 1143

En todo momento se tuvo presente la dirección del grano del material, con el objetivo de que el rendimiento mecánico evaluado mediante los ensayos a fatiga tuviera las mismas condiciones en todos los test. Según las especificaciones de ASTM hay tres planos a tener en cuenta para diferenciar la distribución de las partículas constituyentes del material [7]. Así el plano LT se refiere al plano de laminación del material, ST al plano transversal y LS al plano longitudinal [8], Figura 2. Este tipo de aleaciones de aluminio aeronáutico tratadas térmicamente y con forma de placa extrusionada son altamente anisotrópicas [9]. De ahí la importancia de tener en cuenta para los ensayos a fatiga la dirección del grano. Todas las probetas fueron fabricadas en dirección paralela al plano de laminación del material, es decir plano LT.

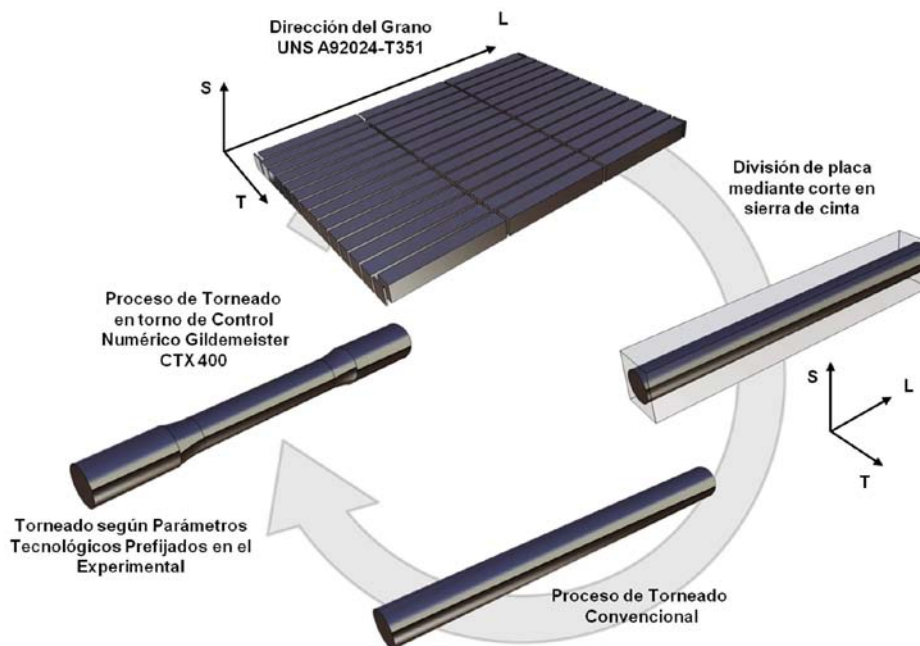


Figura 2: Fases del proceso de Fabricación de las Probetas

El mecanizado final, correspondiente al ensayo de preparación de las probetas para obtener las especificaciones dimensionales mostradas en Figura 1, se realizó en un torno de Control Numérico Gildemeister CTX 400E a una profundidad de pasada de 0.5 mm, aplicando velocidades de corte comprendidas entre 40 m/min y 200 m/min, y avances que variaban entre 0.02 y 0.2 mm/rev.

Con objeto de garantizar las condiciones de torneado, para cada última pasada se utilizó un filo de corte nuevo. Las herramientas utilizadas fueron plaquitas neutras intercambiables de matriz de carburo de wolframio recubiertas de Nitruro de Titanio. (TiN). Con el objetivo de salvaguardar la trazabilidad del ensayo durante todo el proceso de torneado, las plaquitas de corte fueron identificadas según el filo y la

probeta que mecanizaba. Señalar también que todo el proceso de mecanizado en su última pasada se llevó a cabo en presencia de fluidos refrigerantes para adecuarlo a las condiciones de mecanizado que actualmente se emplean en las piezas aeronáuticas de referencia.

Una vez fabricadas las probetas se procedió a la evaluación del acabado superficial de las mismas en términos de Rugosidad Media Aritmética (Ra), mediante el uso de un rugosímetro modelo SM7 de MAHR. En ningún momento del desarrollo experimental se pulieron o rectificaron las superficies obtenidas en el proceso de torneado.

Todas las probetas fueron ensayadas a fatiga por flexión rotativa en una máquina de ensayos Instron modelo R.R Moore, Figura 3. La técnica de fatiga mediante flexión rotativa consiste en la aplicación de una carga constante a flexión aplicada a una muestra cilíndrica de material, combinada con el giro de la muestra alrededor del eje de flexión hasta su rotura.

Tal y como se puede observar en la Figura 3, la probeta se amarra en la zona de ensayo por medio de dos pinzas a los elementos de rotación, de los cuales cuelga el peso con el que se ejercerá el momento flector.

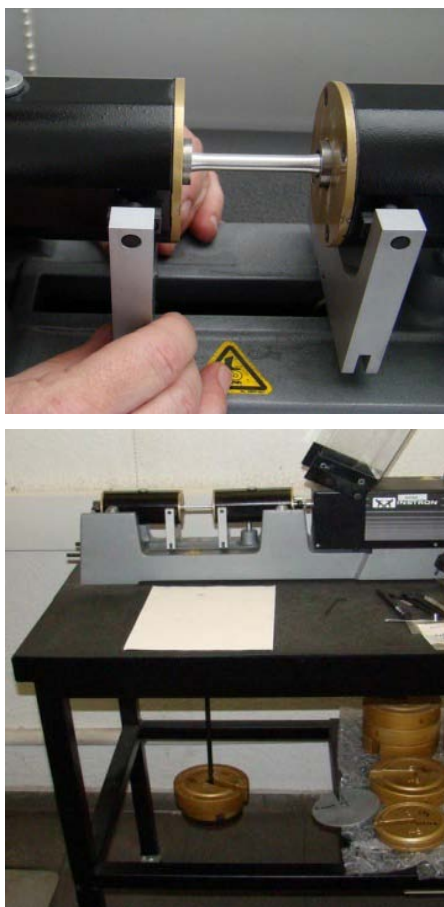


Figura 3. Preparación de probeta para la realización del ensayo a Fatiga mediante Flexión Rotativa

Para los ensayos llevados a cabo en este experimento se simuló la máxima resistencia a fatiga que es capaz de resistir la aleación de aluminio UNS A92024-T351, la cual está tabulada en 138 Mpa.

3. Resultados y discusión

Como se ha comentado, a cada pieza mecanizada se le evaluaron las desviaciones microgeométricas en términos de la rugosidad media aritmética Ra. En la Figura 4 se representa la evolución con el avance, a, de los valores de Ra para distintas velocidades de corte aplicadas, Vc.

En la gráfica de la Figura 4 puede apreciarse un aumento de Ra, lo que conlleva una disminución de la calidad superficial, con el avance para cada una de las velocidades de corte empleadas, lo cual se

encuentra en buen acuerdo con los resultados recogidos en otros trabajos realizados en condiciones similares para aleaciones aeronáuticas [10-13].

Por otra parte, de acuerdo también con lo recogido en [10-13], los resultados representados en la Figura 4 ponen de manifiesto que la influencia de la velocidad de corte en el grado de acabado superficial es notable sólo para avances altos (0.2 mm/rev), donde las velocidades más elevadas dan valores mayores de Ra, apreciándose que la velocidad resulta poco influyente -valores de Ra semejantes- cuando se aplican avances más bajos. En trabajos anteriores se ha relacionado esta circunstancia con la dependencia directa del la altura de las huellas en la superficie con el avance [12,14,15], lo que genera modelos cuasi lineales para la relación Ra(a) [14,15]. Sin embargo, los modelos potenciales que incluyen a la velocidad de corte muestran una dependencia más suave (exponentes inferiores a 0.5 en valor absoluto) en el mismo sentido que se recoge en la Figura 5.

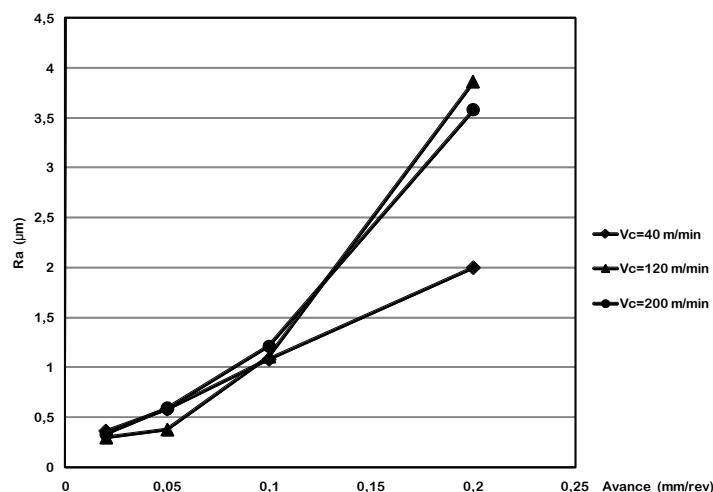


Figura 4: Gráfica Ra frente a Avance para cada Vc

En efecto, en la Figura 5 se representa la gráfica de Ra en función de las Velocidades de Corte para el rango de avances indicado en la misma, pudiéndose apreciar cómo salvo en el caso de avances altos, el rango de variabilidad de Ra con Vc es muy estrecho.

De acuerdo con todo lo comentado anteriormente, esto hace pensar que los defectos funcionales relacionados con Ra deberán verse íntimamente ligados a los avances aplicados.

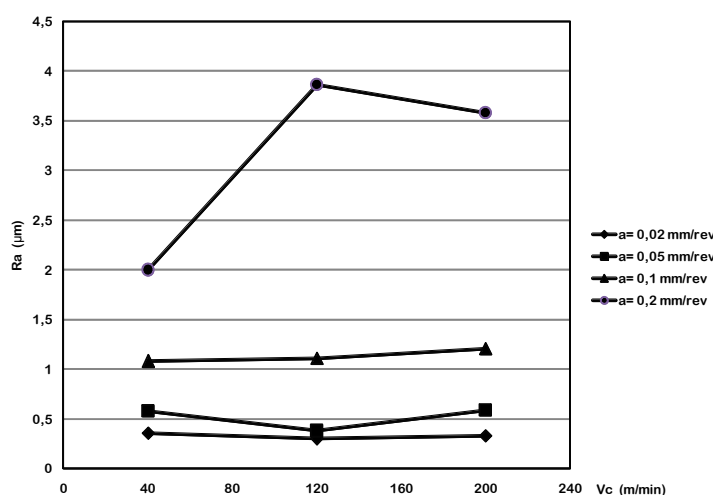


Figura 5: Gráfica Ra frente a Vc para cada avance

Con el objetivo de evaluar la funcionalidad de las piezas obtenidas tras el proceso de mecanizado se sometieron a éstas a ensayos destructivos de fatiga mediante flexión rotativa. De acuerdo con lo comentado anteriormente, sería predecible una disminución de la resistencia a la fatiga con el avance

En la Figura 6 se representa el Número de Ciclos hasta Rotura (N) en función del avance para distintas velocidades de corte aplicadas. Tal y como puede observarse a medida que aumenta el avance descende el valor de N lo que implica una menor resistencia a la fatiga, tal y como se esperaba. Por otro lado, puede observarse cómo, a diferencia de lo que ocurría en el caso de Ra, la velocidad de corte si tiene una mayor influencia en la resistencia a la fatiga. Tal y como se aprecia en la Figura 6, la velocidad de corte resulta altamente influyente a valores más bajos del avance.

Al comparar las Figuras 4, 5 y 6, se puede pensar que el efecto de la velocidad sobre la resistencia a la fatiga no se debe a su influencia en Ra sino que debe estar relacionada con otras propiedades fisicoquímicas características de la Integridad Superficial, como la aparición de tensiones residuales, la liberación de intermetálicos o la dureza. Obsérvese que, en cualquier caso, los mejores resultados se han obtenido a velocidades más bajas, al igual que para Ra, pero con una mayor sensibilidad. No obstante, es preciso hacer constar que la influencia del avance también se va haciendo mayor en relación con la velocidad a medida que aumenta, siendo, pues, el parámetro controlante -de carácter negativo sobre la resistencia a la fatiga- en este tipo de procesos.

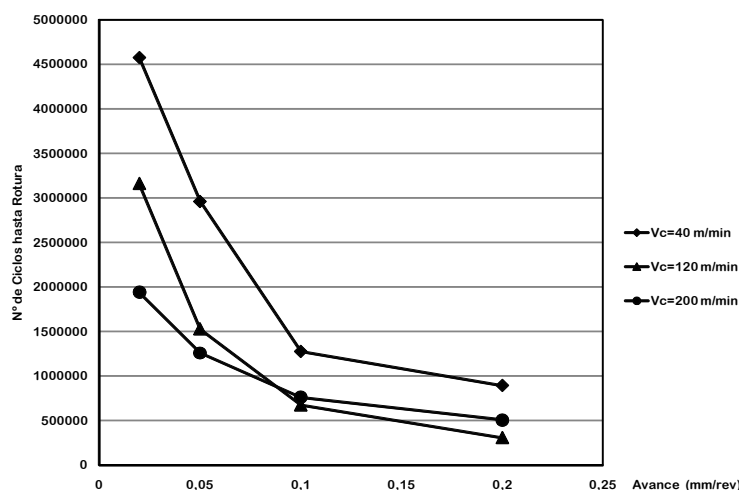


Figura 6: Gráfica N frente a avance para cada Vc

Analizando la Figura 4 para Vc 40 m/min se puede ver que para el avance de 0,05 mm/rev la Ra sigue estando en torno al valor de 0,5 μm , si bien la resistencia a fatiga decae hasta 3 millones de ciclos hasta rotura, Figura 6. El decrecimiento más notable se obtiene para el avance de 0,1 donde la resistencia a fatiga se sitúa por debajo del 1,5 millones de ciclos con una Ra de 1 μm . En este sentido se puede afirmar de forma objetiva que el avance influye de forma negativa en el grado de acabado superficial y a la par en la resistencia a fatiga para todas las velocidades de corte analizadas.

4. Conclusiones

Se ha realizado un Estudio Preliminar de la Influencia del Mecanizado en el Acabado Superficial de Componentes Fabricados con Aleaciones de Aluminio de uso Aeronáutico. En fase posterior se ha analizado el rendimiento funcional de los componentes mecanizados sometiéndolos a ensayos de fatiga mediante flexión rotativa. El material utilizado para los ensayos fue aleación de aluminio-cobre UNS A92024-T351.

De los resultados obtenidos se concluye:

1. El avance influye de forma negativa en la calidad superficial de las probetas mecanizadas, evaluada esta en términos de Rugosidad Media Aritmética, Ra.

2. La influencia de la velocidad de corte sobre el acabado superficial se hace más notable para avances altos. Obteniéndose mejores acabados superficiales conforme la velocidad de corte disminuye.
3. El aumento en la Velocidad de Corte no conlleva una mejora en la Ra para un mismo rango de avance analizado.
4. Desde el punto de vista de la economía del proceso, la calidad superficial obtenida de los componentes no varía excesivamente en el rango de avances comprendido entre 0,02 y 0,1 mm/rev, para todas Vc.
5. De los ensayos a fatiga se desprende que la resistencia a la fatiga disminuye con el avance y con el aumento de la velocidad, en este caso de una forma más sensible que Ra.
6. Por otro lado, también se cumple de manera objetiva, que la resistencia a la fatiga disminuye conforme Ra aumenta.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Proyecto DPI2008-06771-C04-01 y por la Junta de Andalucía (PAIDI). Los autores desean agradecer al Departamento de Materiales y Producción Aeroespacial de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid la ayuda en la parte experimental del presente trabajo.

6. Referencias

- [1] M.H. El-Axir, *A method of modeling residual stress distribution in turning for different materials*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1055–1063
- [2] D. Novovic, R.C. Dewes, D.K. Aspinwall, W. Voice, P. Bowen, *The effect of machined topography and integrity on fatigue life*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 44 (2004) 125–134
- [3] A. Javidi, U. Rieger, W. Eichlseder, *The effect of machining on the surface integrity and fatigue life*, International Journal of Fatigue 30 (2008) 2050–2055
- [4] M. Field, J.F. Kahles *The Surface Integrity of Machined and Ground High Strength Steels*. (1964). DMIC Report 210:54–77
- [5] I.S. Jawahir, E. Brinksmeier, R. M'Saoubi, D.K. Aspinwall, J.C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello, A.D. Jayal, *Surface integrity in material removal processes: Recent advances*, CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 60, Issue 2, 2011, Pages 603-626
- [6] J. Paulo Davim, "Surface Integrity in Machining", Springer, 1st Ed., Londres (Reino Unido), 2009
- [7] ASTM E399-93 "Standard test methods for plane-strain fracture toughness of metallic material"
- [8] Ali Merati, *A study of nucleation and fatigue behavior of an aerospace aluminum alloy 2024-T3*, International Journal of Fatigue 27 (2005) 33–44
- [9] Joel J. Schutte, *Fatigue crack propagation in 7050-T7451 plate alloy*, Engineering Fracture Mechanics 76 (2009) 1037–1048
- [10] M. Marcos-Bárcena, M.A. Sebastián-Pérez, J.P. Contreras-Samper, M. Sánchez-Carrilero, M. Sánchez-López, J.M. Sánchez-Sola, *Study of roundness on cylindrical bars turned of aluminium-copper alloys UNS A92024*, Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005) 644–648
- [11] J.F. Kelly, M.G. Cotterell, *Minimal lubrication machining of aluminium alloys*, Journal of Materials Processing Technology 120 (2002) 327–334
- [12] E.M. Rubio, A.M. Camacho, J.M. Sánchez-Sola, M. Marcos, *Surface roughness of AA7050 alloy turned bars. Analysis of the influence of the length of machining*, Journal of Materials Processing Technology 162–163 (2005) 682–689
- [13] M.S. Carrilero, R. Bienvenido, J.M. Sánchez, M. Álvarez, A. González, M. Marcos, *A SEM and EDS insight into the BUL and BUE differences in the turning processes of AA2024 Al-Cu alloy*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 215–220

4th Manufacturing Engineering Society International Conference

[14] M.A. Sebastian, J.M. Sánchez, M.S. Carrilero, J.M. González, M. Marcos, *Parametric Model for Predicting Surface Finish of Machined AA2024 Alloy Bars*, The International Journal for Manufacturing Science and Production 4(2002) 181-188

[15] M.A. Sebastian, J.M. Sánchez, M.S. Carrilero, J.M. González, M. Alvarez, M. Marcos, *Turned Aluminium Alloys Surface Finish Monitoring through Cutting Force Measurements*, The International Journal for Manufacturing Science and Production 4(2002) 211-220