

Definición de un índice de maquinabilidad para materiales compuestos de matriz termoplástica a partir del estudio experimental

Francisco Mata¹
J. Paulo Davim²

¹ Polytechnical School of Almadén,
University of Castilla-La Mancha,
Plaza Manuel Meca, 1, 13412.
ESPAÑA (SPAIN).

² Department of Mechanical Engineering,
University of Aveiro,
Campus Santiago, 3810-193 AVEIRO,
PORTUGAL.

Correo electrónico (email): Francisco.MCabrera@uclm.es
pdavim@ua.pt

Recibido el 2 de febrero de 2010; aceptado el 26 de junio de 2010.

1. Resumen

En este artículo se propone un índice de maquinabilidad para caracterizar la aptitud al mecanizado de los materiales compuestos de matriz termoplástica.

El índice cuantifica tanto las fuerzas de corte (a través de la fuerza específica de corte) como el acabado superficial (mediante la rugosidad media).

Las medidas experimentales de estos parámetros en procesos de torneado permiten poner de manifiesto cómo la presencia de fibras de refuerzo empeora la maquinabilidad de los materiales. Asimismo, se demuestra que la maquinabilidad mejora si se utilizan herramientas de diamante policristalino (PCD).

Palabras clave: poliamida, PEEK, maquinabilidad, PCD.

2. Abstract (A Machinability Index to Characterize the Machining Aptitude of Thermoplastic Composite Materials)

A machinability index to characterize the machining aptitude of thermoplastic composite materials is proposed in this work.

Machinability index quantifies cutting forces and surface finish. The experimental results indicates that fiber reinforcements produces a worse machinability and the better machinability is given when we use polycrystalline diamond tools.

Key words: poliamide, PEEK, machinability, PCD.

3. Introducción

Los materiales compuestos están formados por dos o más materiales de diferente naturaleza (conocidos como componentes, constituyentes o fases) que al combinarse dan como resultado la mejora de las propiedades que tienen por separado (efecto sinérgico). En general, se habla de dos constituyentes básicos, la matriz y el refuerzo, a los que se le pueden sumar aditivos como componentes minoritarios para mejorar alguna de las propiedades específicas.

En la actualidad, es notable el aumento del uso de materiales compuestos en la fabricación de elementos estructurales. De este modo, los materiales tradicionales como el acero, la madera o el aluminio están cediendo ciertas aplicaciones a los materiales compuestos avanzados, denominados comúnmente "composites", con los que se consiguen mejores propiedades específicas. De forma particular, los materiales compuestos de matriz polimérica, como los polímeros (poliéster, epoxi, etc.) reforzados con fibras de vidrio o con fibras de carbono, presentan unas excelentes relaciones rigidez/peso y resistencia/peso que los hace idóneos para determinados sectores productivos. Estos materiales se han venido utilizando desde hace tiempo en la industria aeroespacial y, más recientemente, han irrumpido con fuerza en el sector naval, en la industria del automóvil o en robótica, como ejemplos significativos, dado que ofrecen un mejor comportamiento que los materiales tradicionales.

La adición de fibras cortas a la matriz polimérica modifica de manera significativa sus propiedades mecánicas, aumentando la rigidez, la resistencia y la dureza, proporcionando adicionalmente un considerable incremento en la máxima temperatura de operación. Por otra parte, la presencia de microfibras de refuerzo permite asemejar el comportamiento

de estos materiales al de los de una sola fase u homogéneos. Las poliamidas se caracterizan por una elevada resistencia mecánica, tenacidad, elasticidad, resistencia a la abrasión, a la fatiga y al ataque químico (Govindan *et al.*, 2000; Palabiyik y Bahadur, 2002; Pedroso *et al.*, 2002; Chen *et al.*, 2003; Chavaria y Paul, 2004; Jordan *et al.*, 2005). Junto a estas características exhiben también muy buena capacidad de amortiguamiento mecánico y buen comportamiento como aislante eléctrico (Botelho *et al.*, 2003). Conservan sus propiedades mecánicas hasta los 150°C. Se utilizan en la fabricación de componentes de maquinaria, robótica y automoción, fundamentalmente (Miravete *et al.*, 2000). Entre estos componentes citamos: cojinetes, rodillos, ruedas, zapatas de desgaste, engranajes, inyectores, etc. La incorporación de fibras de refuerzo mejora las características mecánicas y la estabilidad dimensional de las poliamidas (Franke *et al.*, 2007; Bernasconi *et al.*, 2007), permitiendo trabajar a temperaturas mayores.

Las poli (éter-éter-cetonas) (PEEK) pertenecen a un grupo de materiales termoplásticos de altas prestaciones que aglutinan un conjunto de propiedades excelentes: elevadas propiedades mecánicas, resistencia al desgaste y a la abrasión, resistencia a los agentes químicos y puede trabajar a temperaturas elevadas. Debido a estas propiedades, este material polimérico se aplica con excepcionales prestaciones en la ingeniería. En la bibliografía se encuentran amplias referencias sobre este material (Voss y Friedrich, 1987; Ozden *et al.*, 1999; Davim y Marques, 2001; Abu Bakar *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2004; Rae *et al.*, 2007; Goyal *et al.*, 2007), al que se le ha prestado mucha atención en los últimos años, en especial a su síntesis y al estudio de sus propiedades.

La utilización de los materiales compuestos de matriz polimérica requiere el desarrollo de adecuados procesos de fabricación para obtener componentes mecánicos con características dimensionales rigurosas. El proceso de mecanizado de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras presenta diferencias significativas con el de los metales y las aleaciones (Bhatnagar *et al.*, 1995), y el cuerpo de conocimientos teórico y experimental de los metales no es aplicable directamente. Esto es así porque los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras son anisótropos, heterogéneos y se preparan generalmente en forma laminada o extruida antes de mecanizarlos.

Las propiedades del material tienen una influencia significativa en el desarrollo de las operaciones de mecanizado y, junto con otras características del proceso, se incluyen genéricamente en el término "maquinabilidad". La maquinabilidad hace referencia a la relativa facilidad con la que el material puede ser mecanizado, utilizando las herramientas y los parámetros funcionales de corte apropiados (Groover, 1996).

La aptitud relativa de un material al mecanizado se expresa habitualmente mediante un índice de maquinabilidad. En realidad, se trata de un patrón de maquinabilidad con relación al cual establecer comparaciones que permitan identificar la mayor o menor facilidad/dificultad para el mecanizado. Si bien en los materiales convencionales está aceptado con claridad meridiana un patrón o índice de maquinabilidad, en el caso de los plásticos reforzados no existe un criterio reconocido universalmente, de modo que es preciso, como se desarrolla en este trabajo de investigación, profundizar en el análisis de la maquinabilidad con el fin de establecer pautas y criterios que sirvan como referencia.

4. Desarrollo

4.1. Procedimiento experimental

Los ensayos de mecanizado se han realizado sobre los siguientes materiales:

- a) Poli (éter-éter-cetona) (PEEK)
- b) Poli (éter-éter-cetona) reforzada con 30% de fibras de vidrio (PEEK GF 30)
- c) Poli (éter-éter-cetona) reforzada con 30 % de fibras de carbono (PEEK CF 30)
- d) Poliamida (PA 6)
- e) Poliamida reforzada con 30 % de fibras de vidrio (PA 66 GF30)

Se prepararon probetas de 50 mm de diámetro y 100 mm de longitud a partir de redondos extruidos. En cuanto a las herramientas de corte, se utilizaron pastillas de diamante policristalino (PCD) (DCMW 11T3 04FPDC10) y de carburo cementado (K10) (DCMW 11T3 04 H13A), con un porta tipo SDJCL 2020 K11.

El torno utilizado, CNC "Kingsbury® MHP 50", de 18 kW de potencia y 4500 rpm de velocidad máxima, se refleja en la figura 1.

Los ensayos se desarrollaron sin refrigeración y utilizando tres valores de velocidad de corte (50, 100, 200 m/min) y cuatro valores de velocidad de avance (0.05, 0.1, 0.15 y 0.2 mm/rev), con una profundidad de pasada constante de 2 mm. Para la adquisición de las fuerzas de corte, se ha utilizado un dinamómetro piezoeléctrico Kistler® 9121. El control de los espesores de viruta se ha realizado con un micrómetro digital Mitutoyo® con una amplitud 0-25 mm y sensibilidad 0.001 mm. Finalmente, la medida de la rugosidad de las superficies mecanizadas se ha materializado con un rugosímetro Hommeltester-T1000.

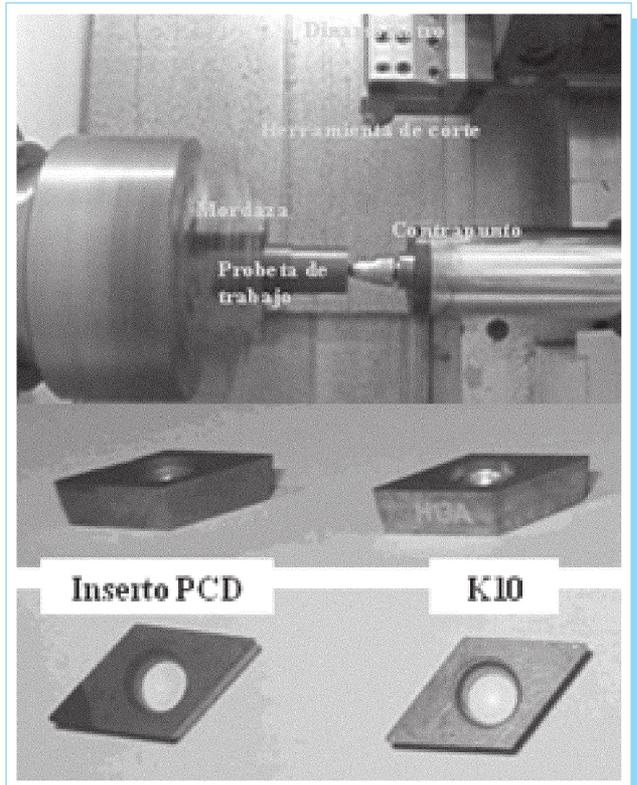


Fig. 1. Torno CNC "MHP Kingsbury" y herramientas utilizadas en los ensayos.

4.2. Propuesta de índice de maquinabilidad

Tal y como se ha comentado, no existe un índice de maquinabilidad universal, en particular en el caso de los materiales compuestos. La rugosidad y la fuerza específica de corte son dos criterios importantes para evaluar la maquinabilidad de un material compuesto (Bernardos *et al.*, 2003; Mata y Davim, 2003; Davim y Mata, 2004). Sobre la base de estos dos parámetros, se propone un nuevo índice de maquinabilidad (IM) definido mediante la siguiente ecuación (Davim y Mata, 2004 y 2007-a):

$$IM = \left[\frac{1}{K_s} \alpha \right] \left[\frac{1}{R_a} \beta \right] \times 10^3 \quad (1)$$

Siendo, K_s la fuerza específica de corte (N/mm^2), R_a la rugosidad (mm), α (N/mm^2) y β (mm) dos coeficientes de ponderación.

Se trata de recoger en un solo valor un indicador de la maquinabilidad que tenga en cuenta dos de los criterios de

maquinabilidad utilizados en esta discusión y que permita establecer comparaciones entre materiales, considerando factores como la herramienta o los parámetros funcionales de corte, en particular la velocidad de corte y la velocidad de avance.

Los valores de α y β se han obtenido para proporcionar una contribución similar tanto para K_s como para R_a en el valor de IM. El cociente entre la fuerza específica media (K_s^*) y la rugosidad superficial media (R_a^*) permite calcular $\alpha = 173$ y $\beta = 1$, para los resultados de este estudio.

5. Resultados y discusión

5.1 Poliamidas

La figura 2 muestra la variación del índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.

Como se puede observar, la influencia de la velocidad de avance es mucho más significativa que la de la velocidad de corte en el valor del índice de maquinabilidad. El índice de maquinabilidad máximo (condiciones de corte óptimas), para los dos

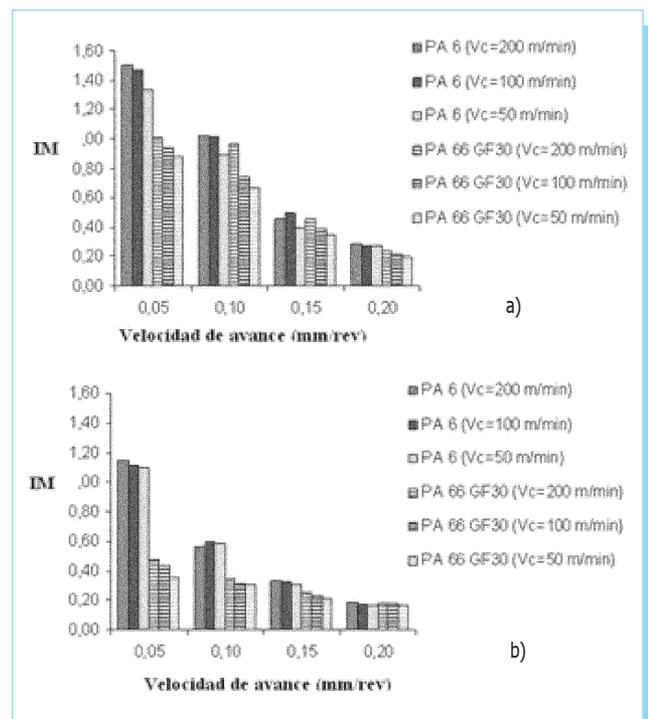


Fig. 2. Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a) PCD, b) K10.

materiales, se consigue para la velocidad de avance más baja ($V_a = 0.05$ mm/rev). La presencia de las fibras de refuerzo en la poliamida PA 66-GF30 se traduce en una reducción del índice de maquinabilidad, aunque este efecto es más significativo para velocidades de avance por debajo de 0.1 mm/rev.

Por otro lado, cuando se utiliza la herramienta K10 se obtienen índices de maquinabilidad más bajos en comparación con la herramienta PCD.

La figura 3 presenta una comparación del índice de maquinabilidad para los dos tipos de herramientas utilizadas para una velocidad de corte particular.

Se puede observar cómo para velocidades de avance cada vez mayores, el índice de maquinabilidad tiende a igualarse y a reducirse considerablemente.

5.2. Poli (éter-éter-cetonas) (PEEK)

La figura 4 muestra la variación del índice de maquinabilidad en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte.

En sintonía con el caso anterior, la influencia de la velocidad de avance es mucho más significativa que la de la velocidad de corte en el valor del índice de maquinabilidad. El índice de maquinabilidad máximo se consigue para la velocidad de avance más baja ($V_a = 0.05$ mm/rev). La presencia de las fibras de refuerzo reduce el índice de maquinabilidad, especialmente en el caso del material PEEK GF30.

Como se puede apreciar, cuando se utiliza la herramienta K10 se obtienen índices de maquinabilidad más bajos en

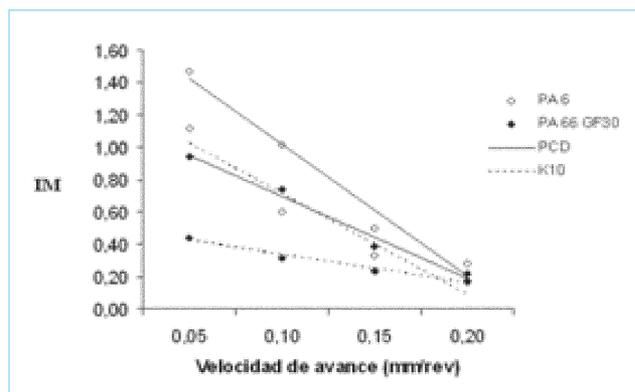


Fig. 3. Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para $V_c=200$ m/min.

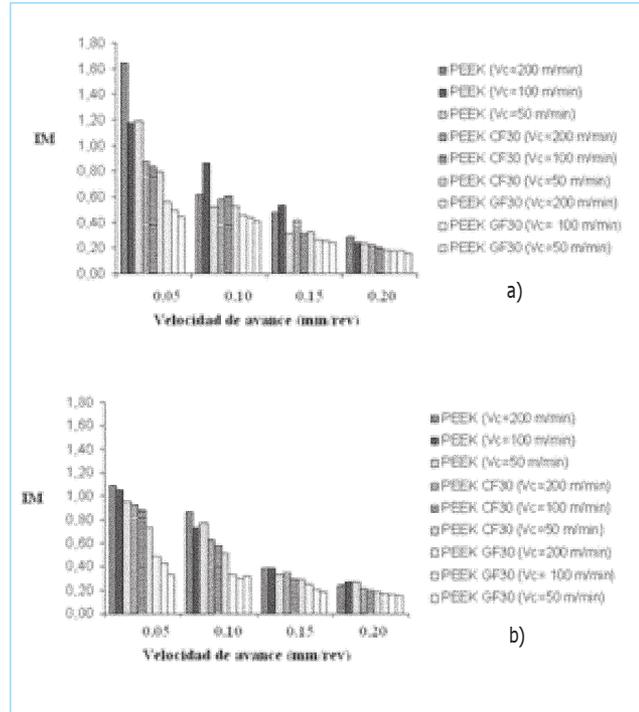


Fig. 4. Índice de maquinabilidad (IM) en función de la velocidad de avance para diferentes velocidades de corte: a) PCD, b) K10.

comparación con la herramienta PCD, en coherencia con lo que ocurría en el caso de las poliamidas.

La Figura 5 presenta una comparación del índice de maquinabilidad para los dos tipos de herramientas utilizadas para una velocidad de corte particular.

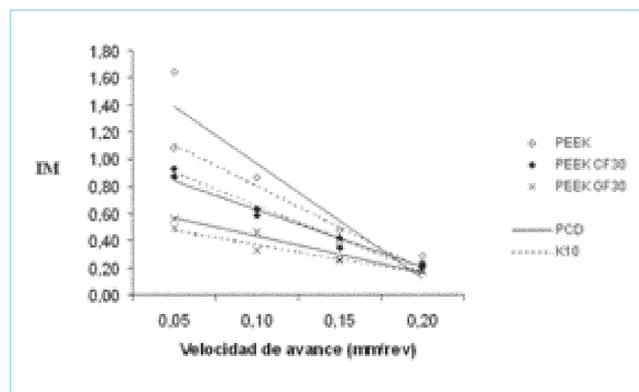


Fig. 5. Comparativa del IM para PCD y K10 en función de la velocidad de avance para $V_c=200$ m/min.

Se puede observar cómo para velocidades de avance cada vez mayores, el índice de maquinabilidad tiende a igualarse y a reducirse considerablemente.

6. Conclusiones

Se ha propuesto una ecuación que permite determinar un valor de referencia en función de la rugosidad media y de la fuerza específica de corte y puede servir para comparar la maquinabilidad de estos materiales. En concreto, se obtienen índices de maquinabilidad mayores para los materiales no reforzados. Por otra parte, se obtiene un índice medio de maquinabilidad mayor al utilizar la herramienta PCD frente a la K10.

7. Referencias

- [1] Abu Bakar, M. S., Cheng, M.H.W., Tang, S.M., Yu, S.C., Liao, K., Tan, C.T., Khor, K.A., Cheang, P. (2003), "Tensile properties, tension-tension fatigue and biological response of polyetheretherketone-hydroxyapatite composites for load-bearing orthopedic implants", *Biomaterials*, Vol. 24, pp. 2245-2250.
- [2] Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N.K. (1995), "On the machining of fiber reinforce plastics (FRP) composite laminates", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 35, No 5, pp. 701-716.
- [3] Bernardos, P.G, Vosniakos, C.G (2003), "Predicting surface roughness in machining: a review", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, pp. 833-844.
- [4] Bernasconi, A., Davoli, P., Basile, A., Filippi, A. (2007), "Effect of fibre orientation on the fatigue behaviour of a short glass fibre reinforced polyamide-6", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 199-208.
- [5] Botelho, E.C., Figiel, L., Rezende, M.C., Lauke, B. (2003), "Mechanical behaviour of carbon fiber reinforced polyamide composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp. 1843-1855.
- [6] Chavarria, F., Paul, D.R. (2004), "Comparison of nanocomposites based on nylon 6 and nylon 66", *Polymer*, Vol. 45, pp. 8501-8515.
- [7] Chen, Y.K., Modi, O.P., Mhay, A.S., Chrysanthou, A., O'Sullivan, J.M. (2003), "The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact", *Wear*, Vol. 255, pp. 714-721.
- [8] Davim, J.P., Marques, N. (2001), "Evaluation of tribological properties of polymeric materials for hip prosthesis applications", *Tribology Letter*, Vol. 11, pp. 91-94.
- [9] Davim, JP, Mata, F., (2004), "Influence of cutting parameters on surface roughness in turning glas-fibre-reinforced plastics using statistical analysis", *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 56 (5), pp. 270-274.
- [10] Davim, JP., Mata, F. (2007-a), "New machinability study of glass fibre reinforced plastics using polycrystalline diamond and cemented carbide (K15) tools", *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 1050-1058.
- [11] Franke, R., Haase, I., Lehmann, D., Hupfer, B., Janke, A. (2007), "Manufacturing and tribological properties of sandwich materials with chemically bonded PTFE-PA 66 and PA 66/GF", *Wear*, Vol. 262, pp. 958-971.
- [12] Govindan Potti, P.K., Rao, B.N., Srivastava, V.K. (2000), "Notched tensile strength for long- and short-fiber reinforced polyamide", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 33, pp. 145-152.
- [13] Goyal, R.K., Tiwari, A.N., Mulik, U.P., Negi, Y.S. (2007), "Effect of aluminium nitride on thermomechanical properties of high performance PEEK", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*.
- [14] Groover, M.P. (1996), *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems*, Prentice Hall International Editions.
- [15] Jordan, J., Jacob, K.I., Tannenbaum, R., Sharaf, M.A., Jasiuk, I. (2005), "Experimental trends in polymer nanocomposites - a review", *Materials Science and Engineering*, Vol. 393, pp. 1-11.
- [16] Mata, F., Davim, J.P. (2003), "An investigation about the precision turning fiber reinforced plastics (FRP's) with diamond cutting tools using multiple analysis regression", in II Iberian Conference of Tribology, España, pp. 107-112.
- [17] Miravete, A., Larrodé, E., Castejón, L., Clemente, R. et al. (2000), *Materiales compuestos* (Tomos I, II), Ed. A.M.
- [18] Palabiyik, M., Bahadur, S. (2002), "Tribological studies of polyamide 6 and high-density polyethylene blends filled with PTFE and copper oxide and reinforced with short glass fibers", *Wear*, Vol. 253, pp. 269-376.
- [19] Pedroso, A.G, Mei, L.H.I., Agnelli, J.A.M., Rosa, D.S. (2002), "The influence of the drying process time on the final properties of recycled glass fiber reinforced polyamide 6", *Polymer Testing*, Vol. 21, pp. 229-232.
- [20] Rae, P.J., Brown, E.N., Orler, E.B. (2007), "The mechanical properties of poly(ether-ether-ketone) (PEEK) with emphasis on the large compressive strain response", *Polymer*, Vol. 48 (2), pp. 598-615.
- [21] Voss, H., Friedrich, K. (1987), "On the wear behaviour of short-fibre-reinforced PEEK composites", *Wear*, Vol. 116, pp. 1-18.
- [22] Zhang, Z., Breidt, C., Chang, L., Friedrich, K. (2004), "Wear of PEEK composites related to their mechanical performances", *Tribology International*, Vol. 37, pp. 271-277.

Instituto Politécnico Nacional

Científica

La Revista Mexicana
de Ingeniería Electromecánica

Promedio de descargas mensuales de artículos:

2007	2 571
2008	2 864
2009	3 651

121 artículos descargados por día en 2009.

Descargas totales por grupo de países (región):

México	45 000
América Latina y el Caribe	34 059
Europa	12 512
Estados Unidos y Canadá	10 413
Asia	3 675
África	586
Oceanía	78

Fuente: Sistema de Información Científica Redalyc
<http://redalyc.uaemex.mx/>