

MODELADO DE LA MICRODUREZA DE MATERIALES COMPUESTOS

M.R. Rosenberger ¹, E. Forlerer ², Carlos E. Schvezov ³

- (1) CONICET - Prog. Materiales, Modelización y Metrología, FCEQYN, Universidad Nacional de Misiones, Azara 1552. (3300) Posadas. Misiones Argentina.
 (2) Departamento de Materiales, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, Av. Gral. Paz 1499, (1650) San Martín.
 (3) Prog. Materiales, Modelización y Metrología, FCEQYN, Universidad Nacional de Misiones, Azara 1552. (3300) Posadas, Misiones. Argentina
e-mail: rrmario@fceqyn.unam.edu.ar, forlerer@cnea.gov.ar

La microdureza de los materiales compuestos de matriz metálica esta afectada por la presencia de partículas de refuerzo en la subsuperficie del material. La microdureza está directamente relacionada a las propiedades de desgaste del material compuesto. Un modelo numérico empleando elementos finitos fue desarrollado para cuantificar el efecto del diámetro del refuerzo y su profundidad en el diámetro de impronta sobre la muestra. El modelo incluye un indentador esférico, el cual es presionado contra un metal blando como el aluminio, que contiene partículas de refuerzo. Los resultados del modelo son validados comparando el tamaño de la impronta dado por el modelo con los valores dados por un ensayo de dureza Brinell. Los resultados muestran una muy buena concordancia entre los valores predichos y los valores tabulados. El modelo es empleado como una primera etapa para predecir el tamaño de la impronta de un material compuesto consistente de una única partícula de refuerzo del mismo diámetro que el indentador. El modelo es dinámico y simula la aplicación gradual de la carga en un lapso de 30 segundos luego del cual el indentador es retirado. Los diámetros de la impronta para el material reforzado y sin reforzar son comparados, así como el campo de tensiones y deformaciones en ambos materiales. Los resultados muestran que la impronta de los materiales reforzados es más pequeña que para los no reforzados y los valores dependen de la posición y diámetro de la partícula de refuerzo. Los resultados del modelo son utilizados para explicar la dispersión observada en los valores de dureza medidos en los materiales reforzados.

Palabras Claves: Elementos Finitos, Microdureza, Materiales Compuestos.

The microhardness of metal matrix composites is affected by the presence of reinforcing particles in the subsurface of the material. The microhardness is directly related to the wear properties of the composite. In the present investigation a finite element model is developed to quantify the effect of the diameter of the reinforcement and its depth in the indentation diameter in the sample. The model includes a spherical indenter, which is pressed against a soft metal like aluminum, which contains reinforcing particles. The results of the model are validated comparing the predicted values of indentation impression, the given properties of the model material and the standard impression given by the Brinell method. The results show a very good agreement between predicted and tabulated impressions. The model is employed as a first step, to predict indentation impressions in simple configurations of composites consisting of a matrix containing one particle of the same diameter as the indenter. The model is dynamic and simulates the constant load, which is applied during thirty seconds after which the indenter is retried. The diameters of the impressions for reinforced and matrix materials are compared, as well as the stress and strain fields in both materials. The results show that the impressions of reinforced materials are smaller than those for non-reinforced materials and the values depend on the position of the particle. The model results are discussed in relation with the resulting scatter of hardness values.

Key Words: Finite Element Method, Microhardness, Composite Materials.

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas locales son empleadas para caracterizar los efectos del proceso de fabricación en la estructura y microestructura de las piezas mecánicas. Una de las técnicas de medición más empleadas son las determinaciones de microdureza [1-3]. Cuando se trata de materiales compuestos conformados por una matriz dúctil y partículas duras como refuerzos, se ha encontrado una elevada dispersión en las medidas de microdureza, mayor al 20% [4-8], la cual puede explicarse con los modelos teóricos de endurecimiento de los materiales compuestos [9-13], a saber:

- Modelos de endurecimiento de la matriz.
- Modelos de transferencia de carga al refuerzo.
- Modelos que combinan los dos anteriores [9].

Los modelos de endurecimiento de la matriz tienen en cuenta la presencia de numerosas interfases partícula-matriz; formación de alta concentración de dislocaciones en las áreas interfaciales; desarrollo de tensiones internas en la matriz; cinéticas de precipitación aceleradas como factores principales de endurecimiento. Los modelos de transferencia de carga consideran refuerzos duros e indeformables que pueden soportar y transmitir la carga mejor que la matriz, dentro de estos se enmarcan el modelo de Eshelby y los llamados de "shear lag", donde su característica principal es que la transferencia de carga tiene un límite dado por los esfuerzos de corte en la interface entre la matriz y el refuerzo. Los modelos de *Shear lag* han mostrado ser satisfactorios para bajas proporciones en volumen de refuerzo [13, 14]. Los modelos de

endurecimiento de la matriz han resultado adecuados para los casos donde el tamaño del refuerzo menores al micrómetro [15].

En este trabajo se ha estudiado mediante modelización la influencia de la profundidad y tamaño de las partículas subsuperficiales en los valores de microdureza. Considerando el caso de partículas grandes se ha empleado un modelo de shear lag simplificado, el cual supone una interfase débil entre partícula y matriz, vinculada solamente por fuerzas de fricción del tipo que siguen la ley de Amonton, por lo tanto representan la situación más conservadora respecto a la acción de refuerzos duros en materiales compuestos de matriz dúctil.

El modelo se confeccionó empleando el método de elementos finitos y se validó con valores experimentales para el caso de un material sin reforzar.

II. MÉTODOS

Descripción del sistema

El sistema a modelar consiste de una matriz seminfinita con un refuerzo esférico colocado en la subsuperficie, un indentador de punta semiesférica colocado perpendicularmente a la superficie y alineado con el refuerzo, como se muestra en la Fig. 1.

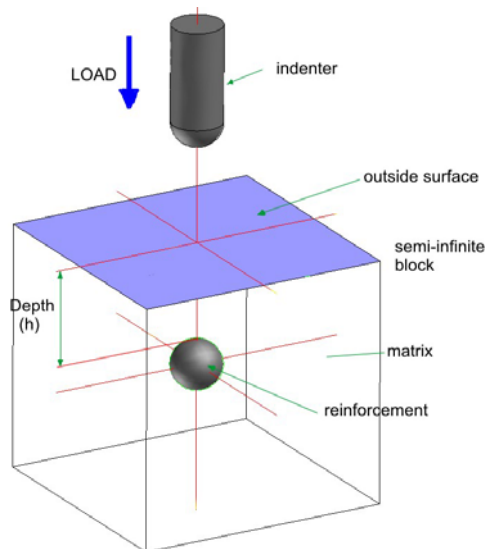


Figura 1: Descripción del sistema a modelar.

La carga sobre el indentador es aplicada en forma gradual, de tal manera de introducirlo en el material compuesto en un lapso de 30 segundos y luego es retirada, con lo que el indentador se retira a su posición inicial de contacto con carga igual a cero.

Las relaciones entre el tamaño de la partícula y el indentador, utilizadas en este estudio, son de: 0.25, 0.5 y 1. Las relaciones entre la profundidad de la partícula y el radio del indentador son de: 0.1, 0.3, 0.5 e infinito.

Para evitar las desviaciones introducidas en las medidas de dureza que ocurren al utilizar cargas pequeñas, necesarias para tener una impronta pequeña y adecuada al tamaño de indentador, conocidas como

“efectos de tamaño” [2,3,16] se ha trabajado con valores de cargas típicamente empleadas en macrodureza y tamaños de refuerzo grandes. Estas consideraciones permiten pasar por alto los procesos microscópicos de endurecimiento en la matriz debido a dislocaciones, empleándose modelos macroscópicos y enfocarse en el modelo de transferencia de carga.

El modelo matemático

Sobre la base de un sistema en equilibrio se aplicaron al modelo las siguientes simplificaciones:

- Comportamiento lineal en la etapa de deformación elástica, tanto en la partícula como en la matriz.
- Modelo de fluencia de Von Mises para la deformación plástica, con endurecimiento isotrópico en la matriz.
- Comportamiento isotérmico del sistema.

Además, dada la disposición del sistema se empleó un modelo de simetría axial para reducir el dominio.

En vista de que el modelado es dinámico e implica gran deformación de los materiales, se emplea una formulación Lagrangiana de las superficies de contacto, además para evitar la distorsión de los elementos se realiza el remallado automático de la nueva geometría obtenida de las sucesivas deformaciones en cada paso de tiempo.

Cada subdominio: indentador, partícula y matriz está cubierto de una malla íntegra que interactúa con la malla de los demás subdominios en contacto, imponiendo una condición de rozamiento y evitando la superposición de subdominios empleando un método de penalización.

En el modelo se emplea el método de elementos finitos. El análisis en función del tiempo se realiza en forma implícita empleando un paso de tiempo variable, cuyo valor inicial es de 10^{-7} s, paso de tiempo máximo igual a 0.1 s y un valor promedio de 0.001 s. El sistema de ecuaciones resultante se resuelve mediante el método de Newton-Raphson. [17-19]

Para discretizar el dominio se emplearon elementos toroidales de simetría axial y sección cuadrangular, con funciones de interpolación de primer orden. En las regiones de los contornos, donde hay contacto entre subdominios fueron colocados una mayor concentración de nodos, de tal manera que reproduzca el campo de tensiones y deformaciones con el mayor detalle. Especial cuidado se puso al refinar la malla en la región que determinará el diámetro final de la impronta, tal como se muestra en la Fig. 2.

Condiciones iniciales y de contorno

La zona paralela a la superficie externa ubicada a una profundidad igual a 0.1 m se considera inamovible y rígida.

La carga es aplicada, sobre el indentador, en dirección normal a la superficie externa del bloque y es

incrementada gradualmente hasta 14709 N durante 30 segundos, luego es retirada.

Entre las superficies de contacto de partícula y matriz, e indentador y matriz se impusieron un valor del coeficiente de rozamiento constante igual a 1.

El nivel de tolerancia para los cálculos es para un error relativo global inferior a 10^{-3} .

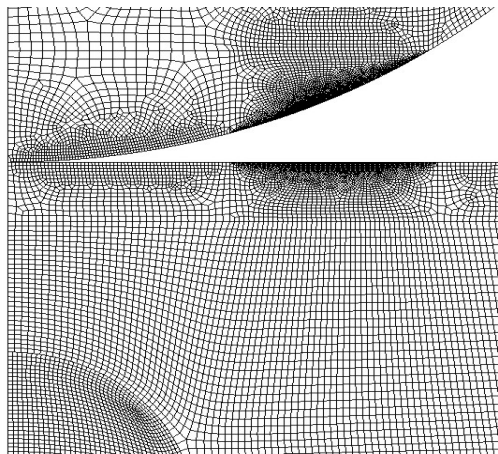


Figura 2: Detalle de la malla empleada en el modelo.

Propiedades de los materiales

Se impuso a la matriz las propiedades del aluminio puro, al indentador las de un acero endurecido y al refuerzo las propiedades del carburo de silicio [20,21], cuyos valores se detallan en la Tabla 1. Todas las propiedades fueron declaradas independientes de la temperatura y de la velocidad de deformación.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla II se detallan los valores de la profundidad final del refuerzo, el diámetro y profundidad de la impronta, el número de dureza Brinell y el desplazamiento de la superficie en el lugar donde se toma la medida del diámetro de la impronta obtenidos como resultado de la simulación, para cada uno de los casos considerados, explicitados en la misma tabla.

De los resultados presentados en la Tabla II no se observa una relación directa y simple de los parámetros empleados en los modelos: diámetro y profundidad inicial del refuerzo. Esto indica una relación compleja entre el refuerzo y la matriz durante el proceso de penetración típico de un ensayo de dureza.

Un estudio minucioso debe tener en cuenta los campos de tensiones y deformaciones que se obtienen en cada caso y su influencia en el desplazamiento de los materiales durante la penetración del indentador. Este desplazamiento puede provocar hundimiento (*sinking in*) o amontonamiento (*piling up*) de material en la superficie alrededor de la impronta [22, 23, 24] los cuales influyen notoriamente en la profundidad y diámetro de la impronta y por lo tanto en los índices de dureza que utilizan estos valores para su determinación, tales como los número de dureza Brinell, Vickers, Meyer o Rockwell.

Tabla I: Propiedades de los materiales

Propiedad	Aluminio	Acero	SiC
Densidad [kg/m ³]	2700	7800	3210
Módulo de Elasticidad [GPa]	70	200	400
Tensión de Fluencia [MPa]	215	700	-
Tensión de rotura [MPa] (ε)	250 (0.20)	830 (0.20)	-
Módulo de Poisson	0.33	0.287	0.19

En la Fig. 3.a se muestra el campo de tensiones de von Mises para el material sin reforzar en el momento de máxima carga aplicada. Se puede observar que la mayor tensión se concentra en la subsuperficie a 1.22 mm de la punta del indentador y disminuyendo por debajo del valor de fluencia de la matriz a partir de los 7.9 mm de profundidad y más allá de los 6.6 mm del eje del indentador en la superficie.

En la Fig. 3.b se muestra el desplazamiento

Tabla II: Parámetros de Ensayo y Resultados. (Radio del indentador = 5.0 mm)

Caso	Radio refuerzo [mm]	Prof. del refuerzo [mm]	Rad. ref. / rad.indent.	Prof. ref / rad.inden.	Prof. final [mm]	Diam.imp [mm]	Prof. impronta [mm]	Dureza Brinell	Desplazamiento de la superficie [mm]	
									Horiz.	Vertical
0	-	-	-	-	-	5.33	0.562	62.05	0.1069	0.1024
1	1.25	2.5	0.25	0.50	2.54	5.27	0.562	63.60	0.1121	0.1016
2	2.50	2.5	0.50	0.50	2.51	5.43	0.571	59.58	0.1096	0.1034
3	5.00	2.5	1.00	0.50	2.50	5.33	0.573	62.05	0.1336	0.1062
4	1.25	1.5	0.25	0.30	1.58	5.26	0.556	63.87	0.0990	0.1085
5	2.50	1.5	0.50	0.30	1.53	5.23	0.526	64.67	0.1274	0.1203
6	5.00	1.5	1.00	0.30	1.50	5.51	0.658	57.70	0.1507	0.1456
7	1.25	0.5	0.25	0.1	0.875	5.42	0.655	59.70	0.1352	0.1104
8	2.50	0.5	0.50	0.1	0.553	5.28	0.519	63.34	0.1356	0.1288

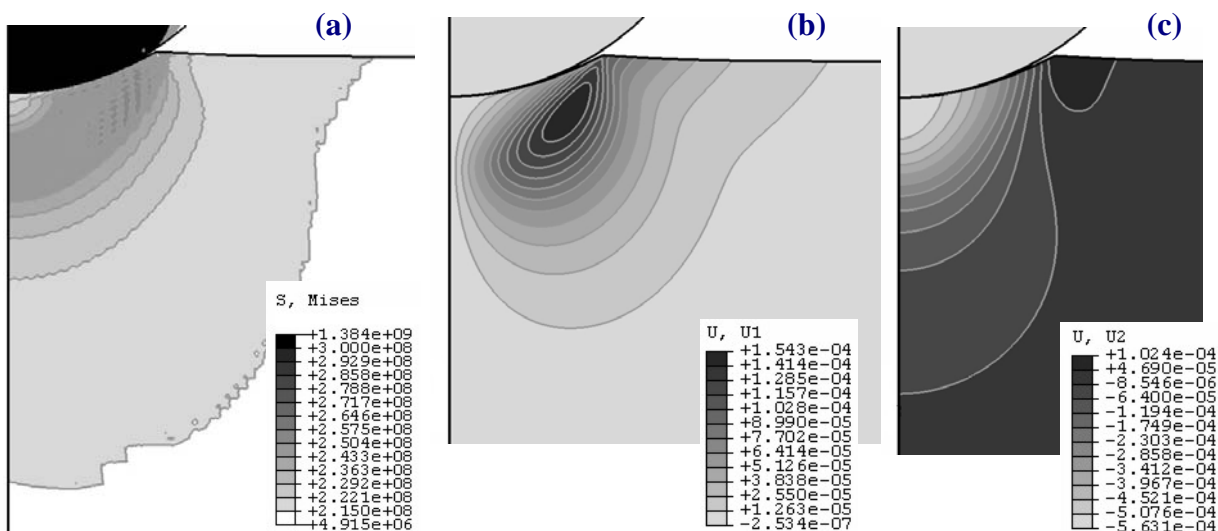


Figura 3: Material sin reforzar. (a) Campo de tensiones de von Mises durante la máxima carga aplicada; (b) desplazamiento horizontal; (c) desplazamiento vertical, (el signo negativo indica desplazamiento hacia abajo).

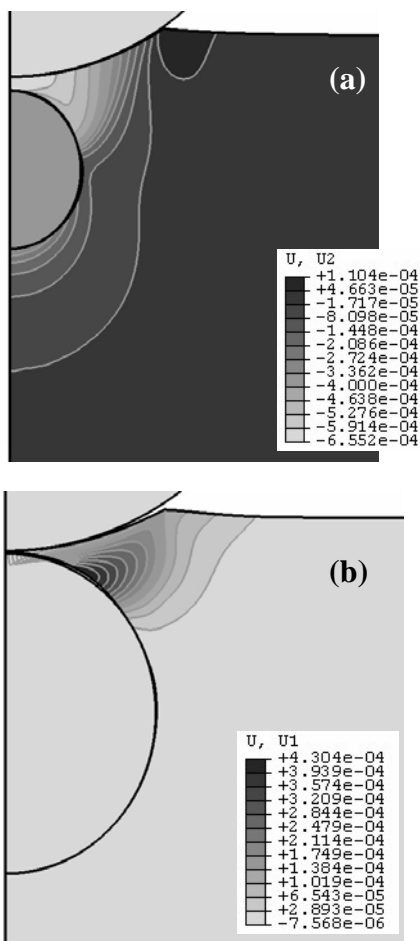


Figura 4. Material reforzado, (a) desplazamiento vertical, caso 7: radio del ref. = 1.25 mm, profundidad = 0.5 mm. (b) desplazamiento horizontal, caso 8: radio del ref. = 2.5 mm, profundidad = 0.5 mm.

horizontal del material al retirarse la carga del indentador, se observa que los mayores desplazamientos, del orden de 0.154 mm, están localizados en la subsuperficie a los 0.7 mm de profundidad y 2.7 mm del eje del indentador. La Fig. 3.c muestra los desplazamientos verticales en el mismo instante, donde se observa un flujo ascendente de material en la superficie junto al indentador y flujo descendente debajo del mismo, que alcanza un desplazamiento hacia abajo de 0.039 mm a los 5 mm de profundidad en la dirección del eje del indentador.

Al analizar el desplazamiento del refuerzo por parte del indentador se observó que un refuerzo de tamaño igual al indentador no es desplazado (casos 3 y 6), y para los tamaños menores que el indentador el grado de desplazamiento es menor a medida que aumenta la profundidad inicial del refuerzo. De manera similar al aumentar el diámetro del refuerzo disminuye el desplazamiento.

Este comportamiento es indicativo de que el refuerzo colabora en soportar la carga aplicada y este efecto es más acentuado cuando el refuerzo es más grande.

La profundidad y el diámetro de la impronta muestran un comportamiento complejo, debido al amontonamiento de material alrededor de la misma observado en todos los casos.

La profundidad de la impronta esta condicionada por la profundidad de refuerzo, así para un refuerzo de diámetro intermedio se observa que ella decrece al disminuir la profundidad inicial de refuerzo (casos 2, 5 y 8), en cambio se observa lo opuesto cuando el tamaño del refuerzo es igual al del indentador (casos 3 y 6). Por otro lado, cuando el refuerzo es más pequeño el comportamiento no es constante (casos 1, 4 y 7). Esta última observación puede interpretarse si se compara el campo de tensiones del material sin reforzar con la

posición y tamaño de la partícula, así en el caso 7 el refuerzo se encuentra impedido de soportar la carga, aunque sí puede transferirla y aumentar el efecto de penetración del indentador, ver la Fig. 4.a. Este efecto no es tan importante en los casos 1 y 4, por lo tanto, se observa una disminución de la profundidad de la impronta al disminuir la profundidad del refuerzo.

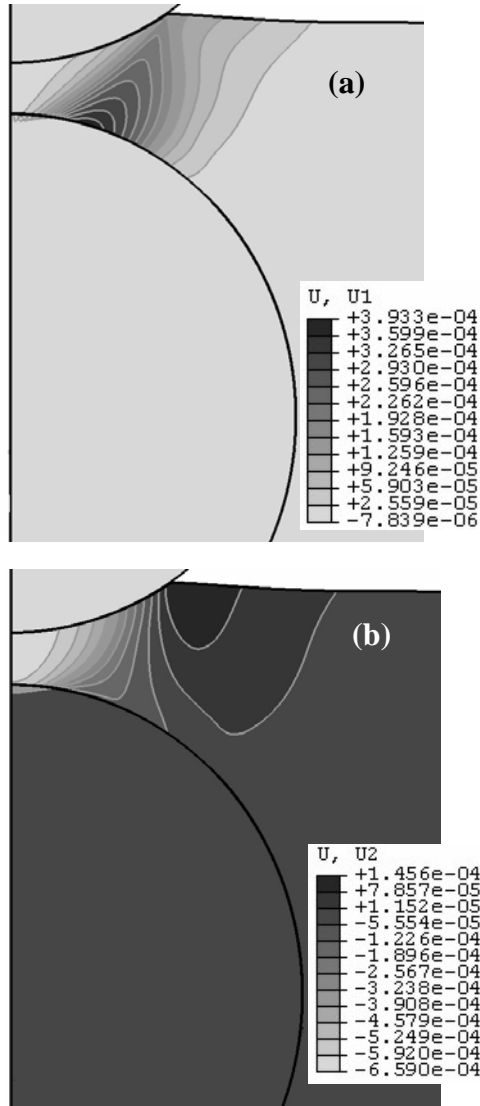


Figura 5 Material reforzado del caso 6: radio de refuerzo = 5 mm, profundidad de refuerzo = 1.5 mm. (a) Desplazamiento horizontal, (b) desplazamiento vertical.

En cuanto al refuerzo más grande y cercano a la superficie, caso 6, se observa en la Fig. 5.a y 5.b una menor cantidad de material debe acusar la deformación plástica, que no puede absorber la partícula rígida, por lo tanto, el estado de tensiones hace que se presione al material y se dirija hacia la superficie tomando el camino más corto, por otro lado en el caso 3 hay una mayor cantidad de material sometido a tensión y la subsuperficie prácticamente no asciende, esto se puede verificar con el valor del ascenso vertical de la zona

alrededor de la impronta dado en la tabla II, siendo 0.1456 mm y 0.1062 mm para los casos 6 y 3, respectivamente.

Al analizar la influencia del diámetro del refuerzo se observa que la profundidad de la impronta disminuye al disminuir el diámetro del refuerzo, casos 1, 2 y 3; y casos 5 y 6; excepto en los casos 4, 7 y 8, donde para los dos últimos se puede explicar considerando que en el caso 8 hay contacto entre indentador y refuerzo, el cual detiene al indentador en forma efectiva, ver la Fig. 4.b.

Respecto al diámetro de la impronta se observa que disminuye al aumentar la profundidad del refuerzo, si se excluye del análisis los casos donde la partícula se coloca más profundamente. Esto hace suponer que hay una profundidad crítica, menor que 5 mm, por debajo de la cual el refuerzo tiene menor efecto para soportar la carga. Suposición que se ve reforzada al considerar la influencia del diámetro del refuerzo el cual tiende a disminuir el diámetro de la impronta cuando éste aumenta, si se consideran los casos 7 y 8; 4 y 5; y 2 y 3. Por otro lado, el caso 1, refuerzo pequeño y profundo, y el caso 6, refuerzo grande de profundidad intermedia evidencian disposiciones donde hay otros mecanismos que afectan en mayor medida el flujo de material.

En el caso 1 la influencia del refuerzo es insignificante y en el caso 6 hay un impedimento en el flujo de material hacia abajo y promoviéndose el flujo lateral y hacia arriba en forma significativa, ver Fig. 5, y los valores de desplazamiento de los alrededores de la impronta en la Tabla II.

La comparación global de los resultados muestra una gran influencia del tamaño y profundidad del refuerzo en el flujo de material en la matriz, ya que provocan excesiva acumulación de material en los alrededores de la impronta, introduciendo errores en aquellos índices de dureza que se valen de las medidas de profundidad y diámetro de la impronta.

IV. CONCLUSIONES

El flujo de material inducido por la penetración de un indentador en un material dúctil conteniendo un refuerzo esférico duro en su subsuperficie se ve muy influenciado por el diámetro y profundidad del refuerzo.

La capacidad de soportar la carga está directamente relacionada con el diámetro del refuerzo e inversamente con la profundidad de las mismas.

El flujo de material desplazado por el indentador produce elevación de los alrededores de la impronta influenciando en las medidas de diámetro y profundidad de la misma.

En los casos analizados: con refuerzos de 1.25 a 5 mm de radio y 0.5 a 2.5 mm de profundidad. Con carga aplicada de 14709 N e indentador esférico de 100 mm de diámetro las imprecisiones al determinar el diámetro y profundidad de la impronta modifican ligeramente los valores de dureza en un 5%.

V. REFERENCIAS

- 1- Drissi-Habti, M.; Nakano, K. "Local mechanical characterization and modelling of the interfacial behaviour in Hi-Nicalon/BN/a-Si₃N₄ ceramic matrix composites by way of instrumented microindentation tests". J. Eur. Ceram. Soc., 18, 1845-1855 (1998).
- 2- Yuan, H.; Chen, J. "The role of intrinsic material length scales in micro-indentation simulations" Comp. Mat. Sci., **25**, 253-263 (2002).
- 3- Yoldas, O.; Akova, T.; Uysal, H. "Influence of different indentation load and dwell time on Knoop microhardness tests for composite materials" Polym. Test., **23(3)** 343-346 (2004).
- 4- Rosenberger, M.R.; Forlerer, E.; Schvezov, C.E. "Wear of different aluminum matrix composites under conditions that generate a mechanically mixed layer". Wear, **259(1-6)**, 590-601 (2005).
- 5- Zhang, J.; Alpas, A.T. "Delamination wear in ductile materials containing second phase particles". Mat. Sci. Eng. A, **160**, 25-35 (1993).
- 6- Venkataraman, B.; Sundararajan, G. "The sliding wear behavior of Al-SiC particulate composites II. The characterization of subsurface deformation and correlation with behaviour". Acta Mater., **44(2)**, 461-473 (1996).
- 7- How, H.C.; Baker, T.N. "Characterisation of sliding friction-induced subsurface deformation of saffil-reinforced AA6061 composites". Wear, **232**, 106-115 (1999).
- 8- Khor, K.A.; Gu, Y.W.; Pan, D.; Cheang, P. "Microstructure and mechanical properties of plasma sprayed HA/YSZ/Ti6Al4V composite coatings". Biomaterials, **25**, 4009-4017 (2004).
- 9- Wu, Y.; Lavernia, E.J. "Strengthening behavior of particulate reinforced MMCs". Scripta Metall. Mater., **27**, 173-178 (1992).
- 10- Christman, T.; Needleman, A.; Suresh, S. "An experimental and numerical study of deformation in metal-ceramic composites". Acta Metall., **37**, 3029-3050 (1989).
- 11- Jiang, Z.; Li, G.; Lian, J.; Ding, X.; Sun, J. "Elastic-plastic stress transfer in short fibre-reinforced metal-matrix composites". Composites. Sci. Tech., **64**, 1661-1670 (2004).
- 12- Mondali, M.; Abedian, A.; Adibnazari, S. "FEM study of the second stage creep behavior of Al6061/SiC metal matrix composite". Computational Mat. Sci., **34**, 140-150 (2005).
- 13- Aikin, R.M. Jr. "The mechanical Properties of In-situ Composites". J. Metals, **49(8)**, 35-39 (1997).
- 14- Cayron, C. "TEM study of interfacial reactions and precipitation mechanisms in Al₂O₃ short fiber or High volume fraction SiC particle reinforced Al4Cu1Mg0.5Ag squeeze-cast composites". Thesis de Doctorado n° 2246, Escuela Politecnica Federal de Lausanne, Lausanne. Francia. (2000).
- 15- Rosler, J. "Back-stress calculation for dislocation climb past non-interacting particles" Mat. Sci. Eng. A, **339**, 334-339 (2003).
- 16- Sangwal, K. "On the reverse indentation size effect and microhardness measurement of solids". Mat. Chem. Phys. **63**, 145-152 (2000)
- 17- Chandrupatla, T.R.; Belegundu, A.D. "Introducción al estudio del elemento finito en ingeniería". Prentice Hall, México (1999).
- 18- Chapra, S.C., Canale, R.P., in "Numerical methods for engineers", McGraw-Hill (2002).
- 19- Huebner, K.H.; Thornton, E.A. "The finite element method for engineers". John Wiley and Sons, USA (1982).
- 20- Metals Handbook. Desk Edition. H.E. Boyer and T.L. Gall Ed. ASM, Ohio (1985).
- 21- www.memsnets.org/material/siliconcarbidesicbulk/
- 22- Chen, X.; Vlassak, J.J. "A Numerical Study on the Measurement of Thin Film Mechanical Properties by means of Nanoindentation" J. Mat. Res., **16(10)**, 2974-2982 (2001).
- 23- Giannakopoulos, A. E.; Suresh, S. "Determination of elastoplastic properties by instrumented sharp indentation", Scrip. Mater., **40(10)**, 1191-1198 (1999).
- 24- Alcalá, J.; Barone and, A.C.; Anglada, M. "The influence of plastic hardening on surface deformation modes around Vickers and spherical indents", Acta Materialia, **48(13)**, 3451-3464 (2000)