

## Evaluación de la capacidad de soporte de carga de recubrimientos duros depositados sobre la aleación de aluminio 7075-T6<sup>(·)</sup>

E.T. Moreno\*, Y.Y. Santana\*, A.C. Castro\*, E.S. Puchi-Cabrera\* y M.H. Staia\*

### Resumen

En el presente trabajo se ha estudiado el efecto del espesor de una intercapa de NiP autocatalítico (EN), empleada como soporte de carga, en el inicio y desarrollo de la deformación plástica de un sustrato de la aleación comercial de aluminio 7075-T6 con un recubrimiento dúplex (NiP + ZrN), cuando el conjunto es sometido a cargas de indentación esférica. El sistema dúplex se obtuvo mediante la deposición de un recubrimiento autocatalítico *electroless* de Ni-11 % P sobre la aleación de aluminio y, posteriormente, la de un recubrimiento duro de ZrN (PVD) sobre las muestras previamente recubiertas con EN. Se obtuvieron dos sistemas dúplex con intercapas de aproximadamente 30 y 60 mm de espesor. Se realizó la caracterización de los recubrimientos en términos de su morfología, espesor y dureza absoluta. Los ensayos de indentación esférica se realizaron empleando bolas de WC-6 Co de 6 mm diámetro y las cargas normales utilizadas fueron de 10, 15, 25, 50 y 75 N, respectivamente. Todas las indentaciones fueron simuladas mediante el programa Elastica 2.1., con la finalidad de determinar tanto el perfil de tensiones efectivas de von Mises, a través del espesor de las muestras como la carga crítica para el inicio de la deformación plástica en el sustrato. Los resultados experimentales fueron validados con las predicciones teóricas, encontrándose que el sistema dúplex con una intercapa de 30 mm de espesor no ofrece un buen soporte de carga, al menos en las condiciones experimentales evaluadas. Sin embargo, cuando el espesor de la intercapa es de 60 mm, la deformación plástica del sustrato no ocurre siempre y cuando el sistema recubierto sea sometido a cargas de indentación menores que la carga crítica obtenida para dicho sistema, cuyo valor es ~ 16 N.

### Palabras clave

Aleación de aluminio 7075-T6. Recubrimiento dúplex. Ni-P autocatalítico. ZrN (PVD). Indentación esférica. Carga crítica.

## Evaluation of the load-carrying capacity of hard coatings deposited onto a 7075-T6 aluminium alloy

### Abstract

In the present work, the effect of the thickness of an electroless NiP load-support interlayer coating, on the initiation and development of plastic deformation in a 7075-T6 aluminium alloy substrate coated with a duplex coating has been investigated. The duplex system has been obtained by means of the deposition of an electroless Ni-11 wt. % P (EN) onto the aluminium alloy substrate, followed by the deposition of a ZrN film (PVD) on top of the EN coating. The duplex systems that were investigated involved two different EN deposits, with thicknesses of 30 and 60 mm, respectively. The coatings were characterized regarding their morphology, thickness and absolute hardness. Indentation tests with spherical indenters were performed employing 6 mm diameter WC-6Co balls and normal loads of 10, 15, 25, 50 and 75 N. All the indentations were modeled by means of the Elastica 2.1. code, in order to determine the through-thickness von Mises effective stress profile of the samples and the critical load for the initiation of the plastic deformation of the aluminium alloy substrate. The experimental results have been validated by means of such a theoretical analysis. It has been determined that the duplex system with an EN interlayer of 30 mm does not constitute a satisfactory load-support interlayer, for the load values employed in the tests. However, for the coated system with an EN interlayer of 60 mm, the critical load for the initiation of plastic deformation in the aluminium alloy substrate was found to be ~ 16 N, which indicates that such a load-support interlayer avoids the plastic deformation of the substrate at normal loads less than ~ 15 N.

### Keywords

7075-T6 aluminium alloy. Duplex coatings. Electroless Ni-P, ZrN (PVD). Spherical indentation. Critical load.

(·) Trabajo recibido el día 12 de Diciembre de 2006 y aceptado en su forma final el día 10 de Abril de 2007.

\* Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Caracas 1050, Venezuela.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de elementos de máquinas de aleaciones de alta relación resistencia/peso, a fin de reducir este último parámetro en la fabricación de vehículos, permitiría un ahorro económico y contribuiría a una mayor preservación ambiental. Sin embargo, estas aleaciones tienen un desempeño tribológico poco satisfactorio lo cual las hace inapropiadas para aplicaciones donde se presenta un desgaste superficial significativo. A fin de mejorar la condición superficial de estos materiales y reducir su desgaste en servicio se han propuesto una gran variedad de técnicas de modificación superficial<sup>[1 y 2]</sup>.

La mecánica de contacto de los sistemas recubrimiento-substrato ha sido considerablemente estudiada, entre otros, por Sun *et al.*<sup>[3]</sup>, quienes han realizado simulaciones computacionales para evaluar la deformación plástica de diversos substratos blandos recubiertos con películas duras de TiN, TiC, CrN, Ti(N, C), (TiAl)N, WC y DLC. Estos recubrimientos son ampliamente utilizados para reducir el desgaste de los elementos de máquinas empleados en diversas aplicaciones. En general, las aleaciones de bajo peso son blandas y si se les aplican altas cargas que generen tensiones elevadas, se puede inducir su deformación plástica. Esto significa que la capacidad de soporte de carga de los sistemas constituidos por substratos de baja dureza recubiertos con películas duras es muy limitada para aplicaciones que involucran tensiones elevadas, comportamiento que ha sido estudiado previamente por varios autores<sup>[3-7]</sup>.

La deformación plástica es una de las consideraciones más importantes en el diseño mecánico de componentes estructurales. La falla de un sistema constituido por un recubrimiento duro depositado sobre un substrato blando sometido a desgaste, generalmente ocurre debido al desprendimiento del recubrimiento (falla adhesiva) o fractura del mismo (falla cohesiva), así como a la fractura subsuperficial del sistema como consecuencia de la deformación plástica del substrato. Por lo tanto, a fin de entender mejor los mecanismos de desgaste superficial y subsuperficial que involucra el flujo plástico localizado y seleccionar la combinación óptima de substrato y recubrimiento para una aplicación específica, es indispensable determinar la distribución de tensiones que pudieran dar lugar al inicio y desarrollo de la deformación plástica.

Debido a la diferencia entre las propiedades elásticas y plásticas entre los recubrimientos y el substrato, el enfoque de la mecánica de contacto convencional, aplicada a materiales homogéneos, no puede utilizarse directamente para el análisis de las superficies recubiertas<sup>[3 y 8]</sup>. Por consiguiente, se ha-

ce necesario emplear soluciones numéricas o métodos de elemento finito (FEM), a fin de determinar el campo de tensiones elásticas tanto en el recubrimiento como en el substrato.

De esta manera, el objetivo fundamental de la presente investigación es la evaluación del comportamiento mecánico de un sistema constituido por un substrato de una aleación de aluminio con un recubrimiento duro, bajo cargas de indentación, así como la influencia que tiene la presencia de una intercapa o recubrimiento relativamente grueso entre el substrato blando y el recubrimiento duro. Para llevar a cabo este estudio se realizó la simulación de las indentaciones utilizando el programa comercial Elastica 2.1<sup>[9]</sup>. Dicho código está basado en las ecuaciones de Hertz<sup>[10]</sup> y permite determinar la distribución de tensiones en materiales recubiertos, bajo indentación esférica. Las predicciones teóricas relacionadas con el comportamiento de los sistemas recubiertos, obtenidas por esta vía, fueron comparadas con los resultados experimentales, considerándose únicamente los esfuerzos macroscópicos.

## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el presente estudio se utilizaron muestras cilíndricas de una aleación comercial de aluminio 7075-T6, de 28 mm de diámetro y 5 mm de altura. Dichas muestras fueron preparadas metalográficamente hasta obtener un valor de rugosidad ( $R_a$ ) de, aproximadamente, 0,04 mm. Subsecuentemente, los especímenes fueron recubiertos comercialmente con un depósito autocatalítico *electroless* de Ni-P (EN) con, aproximadamente, 11 % en peso de fósforo, reportado por el análisis elemental realizado mediante la técnica de análisis químico por dispersión en la energía de rayos X (EDX).

La deposición se llevó a cabo en la Empresa Reliable Plating, ILL, USA y se obtuvieron dos recubrimientos de  $\sim 30 \pm 6$  y  $\sim 60 \pm 6$   $\mu\text{m}$  de espesor, respectivamente, con valores medios de rugosidad de  $\sim 0,2$   $\mu\text{m}$ . Previamente a la realización de la evaluación mecánica y microestructural así como de la deposición del recubrimiento duro, los depósitos de EN fueron preparados metalográficamente hasta presentar un valor medio de rugosidad de  $\sim 0,02$   $\mu\text{m}$ . La evaluación de la dureza de las muestras recubiertas con EN se llevó a cabo empleando una carga normal de 0,98 N, realizándose seis indentaciones.

El módulo de elasticidad fue determinado mediante ensayos de carga *versus* profundidad de penetración, empleando un equipo de indentación modelo Micro-Hardness Tester 2-107 (marca CSM, Suiza), con un indentador Vickers, resolución de carga de 100  $\mu\text{N}$  y

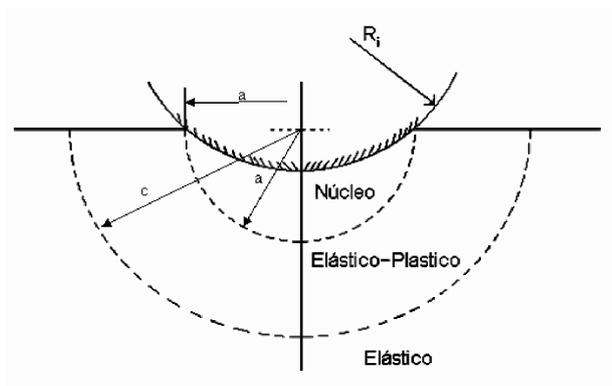
resolución de profundidad de 0,04 nm. El tiempo de aplicación de la carga fue de 15 s. El valor del módulo de elasticidad fue obtenido utilizando el procedimiento reportado por Oliver y Pharr<sup>[11 y 12]</sup>.

Subsecuentemente, se llevó a cabo la deposición de un recubrimiento duro de ZrN sobre las muestras previamente recubiertas con EN, a fin de obtener los recubrimientos dúplex. El recubrimiento de ZrN fue depositado comercialmente por la Empresa Teer Coatings Ltd, Inglaterra, mediante la técnica de bombardeo iónico reactivo con magnetrones desbalanceados de campo cerrado (Closed Field Unbalanced Magnetron Sputter Ion Plating-CFUBMSIP).

El espesor del recubrimiento de ZrN se determinó mediante la técnica del casquete esférico, empleando un equipo "Calotest" (modelo CSM, Suiza), encontrándose que dicho espesor era de, aproximadamente, 3 mm.

Las indentaciones esféricas se realizaron utilizando un Scratch Teste (modelo Revetest, marca CSM, Suiza), en el modo de aplicación de carga constante. Para estos ensayos se utilizaron bolas de WC-6 Co de 6 mm de diámetro. Se emplearon cargas normales de 10, 15, 25, 50 y 75 N, respectivamente y se realizaron seis indentaciones por cada carga, siendo el tiempo de aplicación de esta de 15 s.

Posteriormente, se realizó la medición del radio de contacto (radio residual) de las huellas,  $a$ , a través de un perfilómetro óptico modelo New View 200 marca Zygo, siguiendo el procedimiento propuesto por Eskner y Sandström<sup>[13]</sup>. Con la finalidad de estimar si bajo la aplicación de una carga de indentación determinada se produce la deformación plástica del sustrato en los sistemas recubiertos, se utilizó el modelo de la cavidad<sup>[10, 14 y 15]</sup>, asumiendo que tiene lugar una indentación elastoplástica, tal como se ilustra en la figura 1. Dicho modelo considera un núcleo hemisférico en la



**Figura 1.** Modelo de la cavidad para una indentación esférica<sup>[10]</sup>.

*Figure 1. Cavity model for a spherical indentation.*

zona de contacto, con un radio de contacto,  $a$ , donde existe una presión hidrostática. Fuera del núcleo, para un radio,  $c > a$ , las tensiones tienen simetría radial y son las mismas que se desarrollan en un cuerpo elástico-perfectamente plástico que contiene una cavidad esférica, sometido a una presión hidrostática,  $p_h$ . Cuando el límite elastoplástico de radio,  $c$ , alcanza la intercara recubrimiento-sustrato o excede el espesor del recubrimiento, se espera que el sustrato comience a deformarse plásticamente. El valor del radio elastoplástico viene dado por la ecuación (1)<sup>[10]</sup>:

$$C3 = \frac{E^* a^4}{6(1-\nu_m)R_i \sigma_y} + \frac{2a^3(1-\nu_m)}{3(1-\nu_m)} \quad (1)$$

donde,  $a$  representa el radio de contacto determinado experimentalmente,  $R_i$  es el radio del indentador y  $E^*$  el módulo de elasticidad reducido, el cual viene dado por:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_m^2}{E_m} \quad (2)$$

$\nu_m$  y  $\nu_i$  representan la relación de Poisson de la muestra y del material del indentador, respectivamente,  $E_i$  y  $E_m$  los módulos elásticos del indentador y de muestra, respectivamente, y  $s_y$  la resistencia a la fluencia del sustrato.

Tal como se señaló anteriormente, las indentaciones realizadas experimentalmente fueron simuladas utilizando el programa Elastica 2.1. Las propiedades mecánicas utilizadas en los cálculos se presentan en la tabla I. Además de estas propiedades, el programa se alimenta con los valores de la carga aplicada, radio del indentador y espesor de los recubrimientos.

Se asumió un coeficiente de fricción nulo entre el indentador y la muestra. La resistencia a la fluencia del ZrN se asumió igual al valor de su dureza absoluta, tal como ha sido estudiado anteriormente<sup>[16]</sup> y la resistencia a la fluencia del recubrimiento, EN, se tomó como la tercera parte del valor de su dureza absoluta<sup>[17]</sup>.

La simulación está basada en las ecuaciones de Hertz<sup>[10]</sup> para deformaciones elásticas de un contacto puntual y la suposición fundamental que ha sido realizada, en el sentido que el diámetro residual de la huella corresponde al diámetro de contacto a la máxima carga, ha sido validada por diversos autores<sup>[17 y 18]</sup>.

El criterio para el inicio de la deformación plástica durante la indentación corresponde al momento en el cual la tensión efectiva de von Mises, dada por:

**Tabla I.** Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en los cálculos

*Table I. Mechanical properties of the materials employed in the computation*

Material	Módulo de Young, $E$ , (GPa)	Relación de Poisson, $\nu$	Resistencia a la Fluencia, $s_y$ , (GPa)
Aleación 7075-T6	72 <sup>[4]</sup>	0,35 <sup>[4]</sup>	0,55 <sup>[4]</sup>
Recubrimiento de NiP	160*	0,30 <sup>[5]</sup>	1,67 *
Recubrimiento de ZrN	460 <sup>[14]</sup>	0,19 <sup>[14]</sup>	21 *
Bola de WC-Co (radio = 3 mm)	475 <sup>[19]</sup>	0,22 <sup>[19]</sup>	—

\* Determinado experimentalmente.

$$\sigma_m = \left[ \frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + 6(\tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{zy}^2)}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

excede la resistencia a la fluencia del material. En la expresión anterior,  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ , y  $\sigma_{zz}$ , son las tensiones normales y  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{zy}$ , las tensiones cortantes.

La tensión de von Mises máxima para un material homogéneo bajo indentación se encuentra a lo largo del eje  $z$ , en dirección perpendicular a la superficie del material, a partir del punto correspondiente al contacto circular. A lo largo de dicho eje, todas las componentes cortantes son cero, por lo que las tensiones normales corresponden a tensiones principales y dado que  $\sigma_{xx}$  y  $\sigma_{yy}$  (es decir,  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ ) son iguales, se produce un estado de tensiones de tipo cilíndrico.

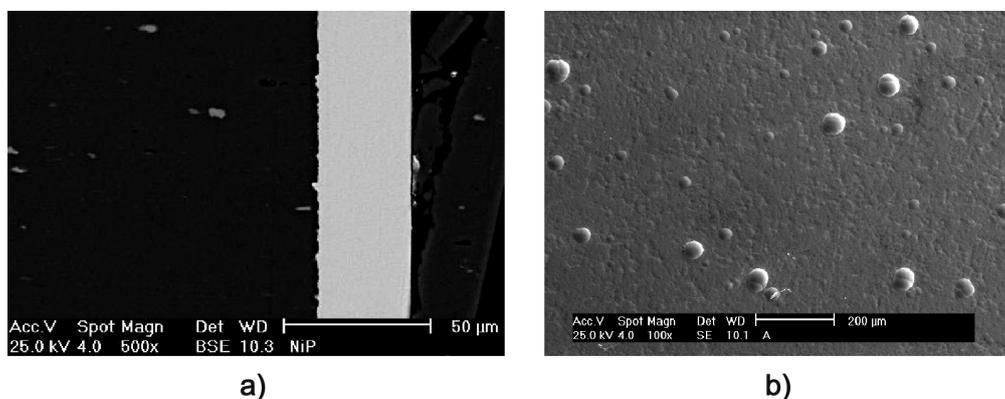
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las micrografías de la figura 2 a) y b) ilustran tanto la sección transversal como la superficie de una mues-

tra recubierta con un depósito de EN en su condición original, es decir, sin postratamiento térmico alguno. En la sección transversal, se observa que el espesor del recubrimiento es uniforme a lo largo de toda su extensión, con una intercara aparentemente libre de defectos, tales como poros y grietas. Por otra parte, la superficie del recubrimiento (Fig. 2 b)), pone de manifiesto la existencia de una estructura de nódulos comúnmente llamada “estructura de coliflor”, de la cual han informado otros autores<sup>[5]</sup>.

Los resultados de las evaluaciones de dureza Vickers para el material base y los recubrimientos de EN fueron de aproximadamente  $1,40 \pm 0,04$  y  $5,00 \pm 0,06$  GPa, respectivamente. Asimismo, a partir de los datos de dureza compuesta obtenidos en el sistema 7075-ZrN, mediante la aplicación de diversas cargas de indentación, y por medio del modelo propuesto por Puchi-Cabrera<sup>[20 y 21]</sup>, se determinó que la dureza absoluta de dicho recubrimiento es de 21 GPa.

Los valores del radio de contacto residual fueron obtenidos a partir del perfil topográfico de las huellas, mostrados en la figura 3 a)-e), determinados



**Figura 2.** Micrografías del recubrimiento de EN, a) Sección transversal y b) Superficie.

*Figure 2. Micrographs of the EN coating, a) Cross section and b) Surface.*

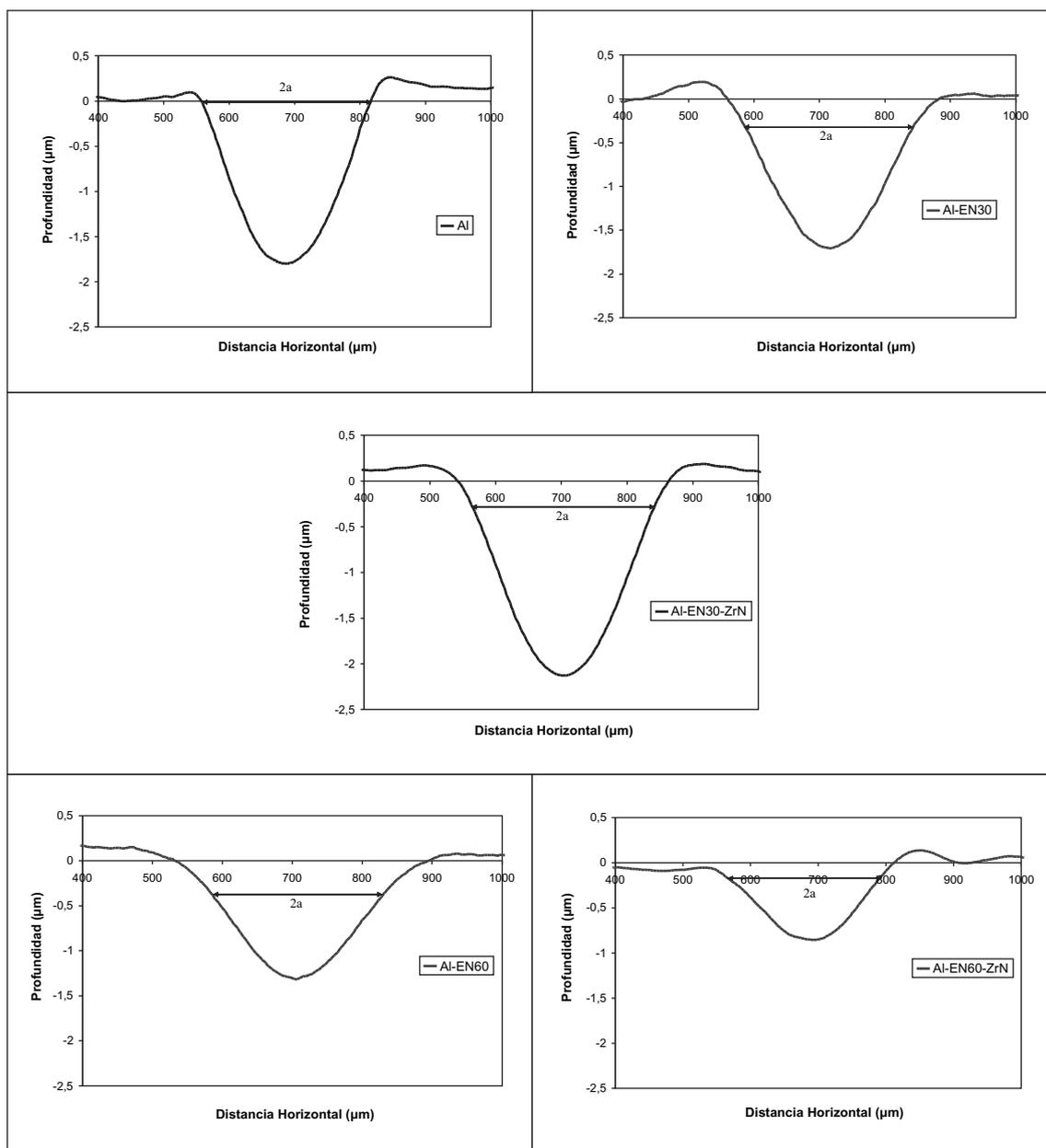


Figura 3. Perfiles topográficos de las huellas de indentación obtenidos para una carga de 75 N.

Figure 3. Indent Topographic profiles for a load of 75 N.

mediante el procedimiento de Eskner y Sandström<sup>[13]</sup>. En algunos casos, la medición del radio de contacto se hace difícil si se presentan los fenómenos de “apilamiento” (*piling-up*) o “hundimiento” (*sinking-in*) del material. De acuerdo a Tabor<sup>[17]</sup>, el “apilamiento” es un fenómeno mediante el cual el material deformado plásticamente se desplaza hacia la superficie causando una elevación. El mismo, no produce un incremento substancial en la dureza, pero puede introducir errores en la medición del radio de contacto y es típico de materiales con un bajo exponente de endurecimiento por deformación.

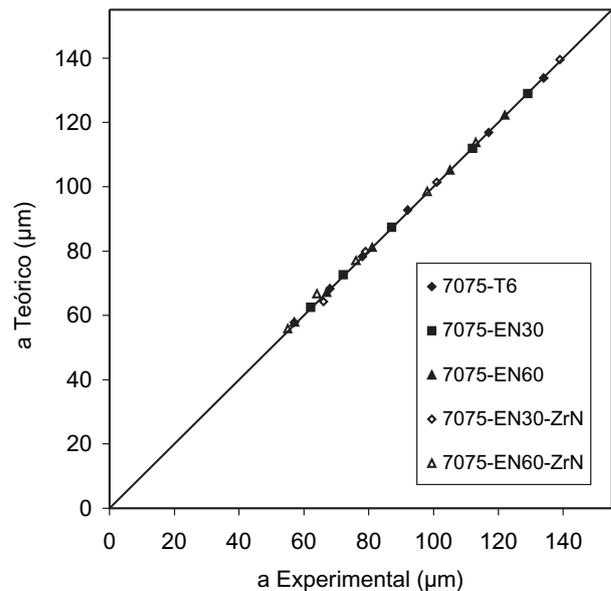
Por el contrario, el fenómeno de “hundimiento” (*sinking-in*), implica que el diámetro de la huella se encuentra por debajo del plano de la superficie y generalmente es típico de materiales con alta capacidad para endurecerse por deformación<sup>[13, 14 y 17]</sup>.

Del análisis de los perfiles topográficos se observó que para las muestras que corresponden al sustrato se presentó el fenómeno de “apilamiento”, tal como se ilustra en la figura 3 a) para una carga de 75 N, situación similar a la encontrada en las otras cargas utilizadas. Sin embargo, para los sistemas recubiertos 7075-EN30, 7075-EN30-ZrN, 7075-EN60 y

7075-EN60-ZrN, no se observó la elevación de material alrededor de la huella, sino por el contrario, el fenómeno de “hundimiento”. A fin de minimizar el efecto de ambos fenómenos en la determinación del radio de contacto, se siguió el procedimiento descrito por Eskner y Sandström<sup>[13]</sup>, evaluando dicho parámetro a partir del punto de inflexión en los perfiles topográficos de las huellas. Los valores así obtenidos se compararon con aquellos determinados teóricamente a través del programa Elastica 2.1, tal como se presenta en la figura 4. En la misma se puede observar una muy buena concordancia entre los valores calculados y medidos de dicho parámetro, lo que pone de manifiesto la pertinencia en la utilización del citado programa a fin de predecir la ocurrencia de la deformación plástica en el sustrato bajo ciertas condiciones de carga y espesor del recubrimiento de NiP.

En la tabla II se presentan los resultados experimentales de las huellas residuales obtenidas mediante indentación esférica.

En la misma, se muestran los valores medidos del radio de contacto residual,  $a$ , de las huellas a las diferentes cargas normales empleadas y el valor del radio correspondiente a la deformación elastoplástica,  $c$ , obtenido a través de la ecuación (1). Los valores de  $a$  y  $c$  están dados en mm. De acuerdo a los valores obtenidos del parámetro  $c$ , presentados en la tabla anterior y según el criterio establecido por Johnson<sup>[10]</sup>, de acuerdo al cual sí  $c$  alcanza o supera el espesor del recubrimiento el sustrato se deforma plásticamente, se puede observar que para el sistema 7075-EN30, a todos los valores de carga ensayados,  $c$  supera el espesor del recubrimiento, por lo que dicho sistema no impide la deformación plástica del sustrato.



**Figura 4.** Comparación entre los valores del radio de contacto ( $a$ ) determinado a través del programa Elastica ( $a$  Teórico) y el determinado experimentalmente ( $a$  Experimental).

*Figure 4. Comparison between the computed ( $a$  Teórico) and experimental ( $a$  Experimental) values of the contact radius.*

De igual forma, para el sistema dúplex 7075-EN30-ZrN, el radio elastoplástico supera el espesor de la intercapa de EN para todas las cargas ensayadas. Sin embargo, para una intercapa de EN de mayor espesor (60 mm),  $c$  no supera el espesor del recubrimiento a una carga de 10 N, lo que indica que en este caso el recubrimiento actúa como un soporte de carga

**Tabla II.** Resultados experimentales de las huellas residuales obtenidas mediante indentación esférica. “ $a$ ” representa el radio de contacto y “ $c$ ” el radio elastoplástico, ambas en mm

*Table II. Experimental results of the residual indents obtained by spherical indentation. “ $a$ ” represents the contact radius and “ $c$ ” the elasto-plastic radius, both in mm*

Material	Carga, N									
	10		15		25		50		75	
	$a$	$c$	$a$	$c$	$a$	$c$	$a$	$c$	$a$	$c$
7075-T6	68	77	78	90	92	110	117	146	134	172
7075-EN30	62	63	72	75	87	92	112	123	129	146
7075-EN60	57	58	67	68	81	85	105	114	122	136
7075-EN30-ZrN	57	51	66	59	79	71	101	92	139	127

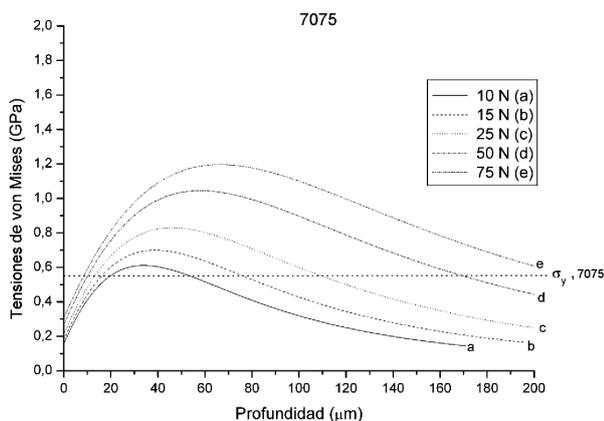
**Tabla III.** Resultados correspondientes a la máxima tensión de von Mises en el sustrato recubierto y sin recubrir, calculados empleando el programa Elastica 2.1.

*Table III. Results corresponding to the maximum von Mises stress in the uncoated and coated substrate, computed by means of the program Elastica 2.1*

Material	Carga (N)									
	10		15		25		50		75	
	$\sigma_{max}$ (GPa)	Z ( $\mu$ m)	$\sigma_{max}$ (GPa)	Z (mm)	$\sigma_{max}$ (GPa)	Z (mm)	$\sigma_{max}$ (GPa)	Z ( $\mu$ m)	$\sigma_{max}$ (GPa)	Z ( $\mu$ m)
Al	0,61	33,9	0,70	38,8	0,83	46,0	1,05	58,0	1,20	66,3
7075-EN30	0,72	30,1	0,81	30,1	0,92	30,1	1,07	30,1	1,16	30,1
7075-EN60	0,54	60,1	0,69	60,2	0,90	60,2	1,21	60,2	1,40	60,2
7075-EN30-ZrN	0,57	33,1	0,66	33,1	0,77	33,1	0,92	33,1	1,00	33,1
7075-EN60-ZrN	0,41	63,1	0,47	71,5	0,64	71,5	0,90	71,5	1,07	71,4

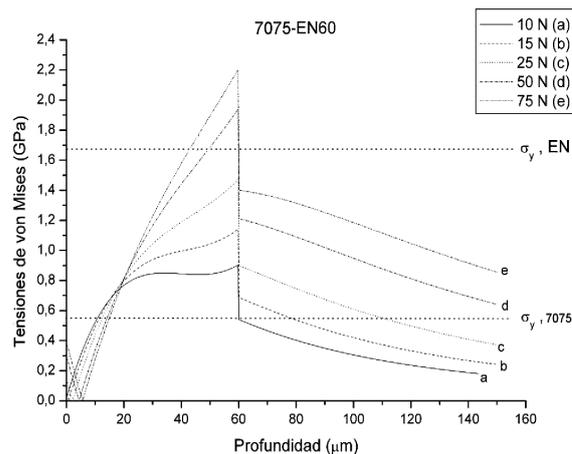
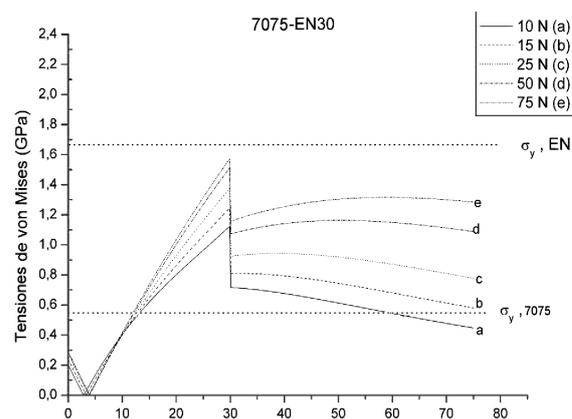
efectivo. Por último, para el sistema dúplex 7075-EN60-ZrN, la capacidad de soporte de carga aumenta en comparación con el sistema 7075-EN60, ya que a valores de carga cercanos a los 15 N, el radio elasto-plástico no alcanza la intercara.

Los resultados numéricos obtenidos empleando Elastica 2.1 se presentan en la tabla III y las figuras 5-7 resumen su representación gráfica, indicándose en cada caso el valor máximo de la tensión de von Mises en el sustrato recubierto y sin recubrir, así como la respectiva coordenada a lo largo del eje z. En la figura 5 se puede observar que para el sustrato sin recubrir, las tensiones de von Mises exceden el valor de la resistencia a la fluencia del aluminio para todos los



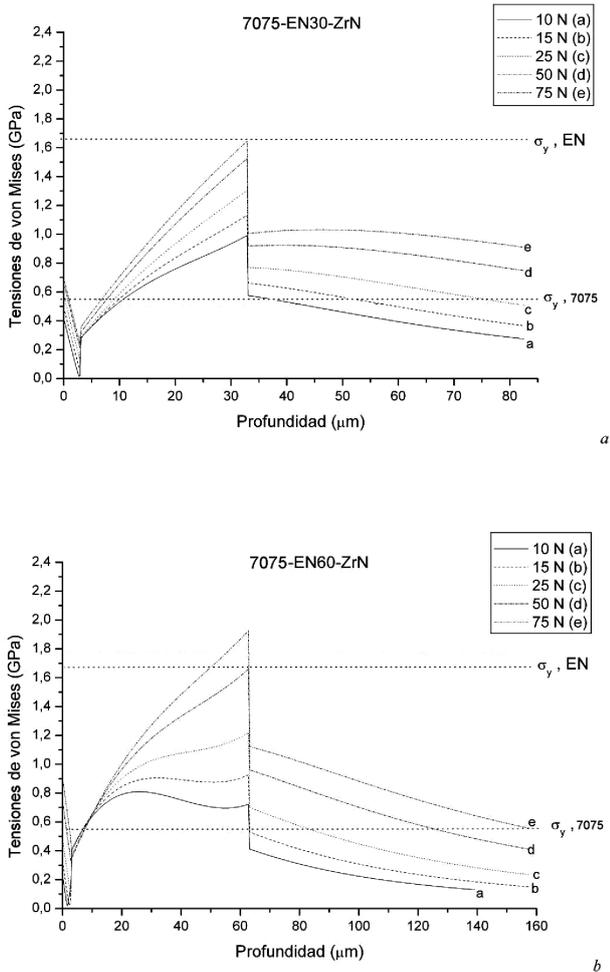
**Figura 5.** Distribución de la tensión de von Mises a lo largo del eje perpendicular a la superficie del sustrato.

*Figure 5. von Mises stress distribution along an axis normal to the substrate surface.*



**Figura 6.** Distribución de la tensión de von Mises a lo largo del eje perpendicular a la superficie de las muestras recubiertas con EN.

*Figure 6. von Mises stress distribution along an axis normal to the surface of the samples coated with an EN deposit.*



**Figura 7.** Distribución de la tensión de von Mises a lo largo del eje perpendicular a la superficie de las muestras con recubrimientos dúplex.

*Figure 7. Von Mises stress distribution along an axis normal to the surface of the samples coated with duplex coatings.*

valores de carga utilizados. En el caso de las muestras recubiertas con EN30 (Fig. 6 a)), el sistema se comporta de manera similar al sustrato sin recubrir, debido a que los valores del máximo esfuerzo, de von Mises, en el sustrato exceden la resistencia a la fluencia de la aleación de aluminio para todos los valores de carga.

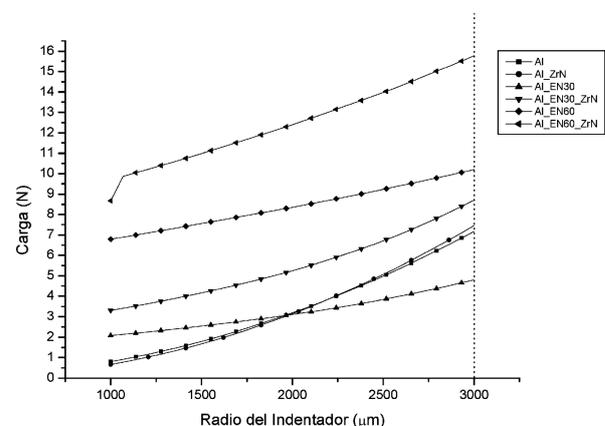
Cuando se indenta el recubrimiento de EN, indistintamente de su espesor, el radio de contacto es siempre menor al diámetro de contacto en el sustrato indentado, tal como se presenta en la tabla II. En el caso particular del EN30, se produce un incremento en el valor de la tensión máxima de von Mises en el sustrato, que supera la resistencia a la fluencia de la aleación 7075-T6. Sin embargo, la situa-

ción mejora cuando se coloca un recubrimiento de EN60, el cual tiene el doble del espesor que el EN30, tal como se puede observar en la figura 6 b). En este caso, las tensiones producidas en el sustrato por la indentación del recubrimiento son menores que aquellas producidas en el sistema con un recubrimiento de EN30, observándose que a una carga aplicada de 10 N el recubrimiento EN60 ofrece un mejor soporte de carga debido a su espesor.

Sin embargo, aún en estas condiciones, el espesor del recubrimiento no es suficiente para proteger completamente al sustrato de la deformación plástica ya que el valor de la tensión de von Mises producida en este último está muy cercana a la de la resistencia a la fluencia de la aleación de aluminio 7075-T6.

Cuando se observa la distribución de tensiones en los sistemas dúplex (Figs. 7 a) y b)) se puede notar que el comportamiento es similar al de las muestras recubiertas con EN. El sistema dúplex Al-EN30-ZrN no mejora la capacidad de soporte de carga en comparación con el sustrato sin recubrir debido a que, a la carga más baja ensayada (10 N), las tensiones alcanzan el valor de la resistencia a la fluencia del sustrato. Sin embargo, en el caso del sistema dúplex Al-EN60-ZrN, la intercapa de EN60 proporciona un mayor soporte de carga que se evidencia, debido a que las tensiones de von Mises en el sustrato exceden la resistencia a la fluencia del sustrato solamente para valores de carga mayores a 15 N.

Adicionalmente, se evidencia que el recubrimiento de ZrN contribuye a disminuir las tensiones de von Mises en el sustrato, cuando se compara con el sistema Al-EN60. La capacidad de soporte de carga también se puede visualizar en el gráfico de carga crítica (valor de carga al cual se produce deformación plástica).



**Figura 8.** Variación de la carga crítica en función del radio del indentador.

*Figure 8. Change in the critical load as a function of the indenter radius.*

ca) en función del radio del indentador (Fig. 8). Para un radio de 3 mm se puede observar que el sistema Al-EN30 presenta el menor valor de carga crítica, seguido de manera ascendente por el sustrato sin recubrir y los sistemas 7075-ZrN, 7075-EN30-ZrN, 7075-EN60 y 7075-EN60-ZrN.

En las figuras 5 y 6 se puede observar que el programa Elastica predice que el esfuerzo de von Mises disminuye progresivamente desde el punto de contacto, hasta hacerse igual a cero a pocas micras de distancia de dicho punto.

Este fenómeno también ha sido constatado por otros investigadores<sup>[5 y 6]</sup> quienes han señalado que, cuando se indenta un cuerpo homogéneo,  $\sigma_{zz}$  ( $\sigma_3$ ) siempre será mayor en magnitud que  $\sigma_{xx}$  y  $\sigma_{yy}$  a lo largo del eje z. Sin embargo, cuando el recubrimiento tiene un menor soporte de carga, se cumple que  $\sigma_{zz} = \sigma_{xx} = \sigma_{yy}$  a una cierta profundidad a lo largo de z, por lo que se pasa a un estado de esfuerzo esférico y el esfuerzo efectivo de von Mises se aproxima a cero.

Finalmente, los valores de carga crítica de cada sistema para un indentador de 3 mm de radio se presentan en la tabla IV.

Estos resultados son provenientes del modelado computacional mediante el programa Elastica y son consistentes con los resultados presentados anteriormente.

## CONCLUSIONES

El recubrimiento autocatalítico de NiP (EN) utilizado como intercapa debe tener un espesor lo suficientemente elevado (> 60 nm) para garantizar que los valores más altos de la tensión de von Mises se desarrollen sólo en la intercapa y por lo tanto, disminuyan las tensiones en el sustrato. Un recubri-

**Tabla. IV.** Valores de carga crítica para el inicio de la deformación plástica, con un indentador de WC-6Co de 3 mm de radio

*Table IV. Critical load values for the initiation of plastic deformation, with 3 mm radius WC-6Co indenter*

Material	Carga Crítica (N)
Al-EN30	4,8
Al	7,2
Al-ZrN	7,7
Al-EN30-ZrN	8,7
Al-EN60	10,2
Al-EN60-ZrN	15,8

miento de EN muy delgado (< 60 nm) puede ser perjudicial para el sustrato, ya que se produce un incremento en la tensión de von Mises que pudiera dar lugar a la deformación plástica de este y, por ende, a la falla del componente recubierto. Por el contrario, cuando se utiliza una intercapa de EN de ~60 nm de espesor o más, el sistema dúplex 7075-EN60-ZrN presenta un buen comportamiento frente a cargas de indentación menores de 15 N, debido a que la carga crítica para el inicio de la deformación plástica es de, aproximadamente, 16 N. Por supuesto, el espesor óptimo de la intercapa depende del diámetro del indentador, ya que sí este aumenta, las tensiones generadas disminuyen, produciendo un valor de carga crítica mayor. Asimismo, se debe tomar en cuenta las propiedades de la intercapa en cuanto a dureza y resistencia mecánica, ya que para valores mayores de estas propiedades, la intercapa presentará un mayor soporte de carga.

## Agradecimientos

La presente investigación ha sido realizada con el financiamiento del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT) a través del proyecto G-2000001591, así como del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH-UCV) a través del Proyecto 08-17-5120-2003. E. Moreno agradece el financiamiento recibido de la Oficina de Planificación del Sector Universitario (OPSU) a través del programa ALMA MATER.

## REFERENCIAS

- [1] K. HOLMBERG Y A. MATTHEWS, *Tribology Series* 28, Elsevier Science B. V. 1994.
- [2] J. A. PICAS, A. FORN, R. RILLA Y E. MARTÍN, *Rev. Met.* Madrid 41 (2005)197-201.
- [3] Y. SUN, A. BOLICHE Y T. BELL, *Thin Solid Films* 271 (1995) 122-131.
- [4] M. H. STAIA, Y. Y. SANTANA Y Z. DEL V. MARCANO, *Surf. Eng.* 20 (2004) 128-134.
- [5] O. WÄSTRAND, N. SCHWARZER, T. CHUDOBA Y Å. KASSMAN-RUDOLPHI, *Surf. Eng.* 18 (2002) 98-104.
- [6] O. WÄSTRAND, Å. KASSMAN-RUDOLPHI Y S. HOGMARK, *Surf. Eng.* 18 (2002) 93-97.
- [7] J. A. WILLIAMS, *Engineering Tribology*, Oxford Science Publications, 1994.
- [8] S. J. COLE Y R.S. SAYLES, *J. Tribol. Trans. ASME* 114 (1992) 334-340.

- [9] T. CHUDOBA, N. SCHWARZER Y F. RICHTER, *Thin Solid Films* 355-356 (1999) 284-289.
- [10] K. L. JOHNSON, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, 1985.
- [11] W.C. OLIVER Y G.M. PHARR, *J. Mater. Res.* 7 (1992) 1.564-1.583.
- [12] W.C. OLIVER Y G.M. PHARR, *J. Mater. Res.* 19 (2004) 3-20
- [13] M. ESKNER Y R. SANDSTRÖM, *Surf. Coat. Technol.* 177-178 (2004) 165-171.
- [14] M. ESKNER AND R. SANDSTRÖM, *Surf. Coat. Technol.* 200 (2006) 2695-2703.
- [15] R. HILL, *The Mathematical Theory of Plasticity*, The Oxford Eng. Sci. Series, 1950.
- [16] J. A. BERRIOS-ORTIZ, J. G. LA BARBERA-SOSA, D. G. TEER Y E. S. PUCHI-CABRERA, *Surf. Coat. Technol.* 179 (2004) 145-157.
- [17] D. TABOR, *Hardness of Metals*, Clarendon Press, Oxford, 1951.
- [18] B. TALJAT, T. ZACHARIA Y F. KOSEL, *Int. J. Solids Struct.* 35 (1998) 4.411-4.426.
- [19] U. RAMAMURTY, S. SRIDHAR, A. E. GIANNAKOPOULOS Y S. SURESH, *Acta Mater.* 47 (1999) 2.417-2.430.
- [20] E. S. PUCHI-CABRERA, *Surf. Coat. Technol.* 160 (2002) 177-186.
- [21] E. S. PUCHI-CABRERA, *Surf. Eng.*, 20 (2004) 332-344.