

# Caracterización de electrorecubrimientos cobre-níquel sobre substratos de zamak utilizando corrientes pulsantes con y sin inversión de polaridad

Characterization of Copper-Nickel Electrodeposition on Zamak Substrate Using Pulsant Currents with and without Polarity Inversion

WILLIAM ARNULFO APERADOR CHAPARRO

Físico y Magíster en Metalurgia y Ciencia de los Materiales de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Profesor Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja)  
waperedor@tunja.uptc.edu.co

ENRIQUE VERA LÓPEZ

Físico y Magíster en Física de la Universidad Industrial de Santander, PhD Universitat Heidelberg. Profesor Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja)

Clasificación del artículo: investigación

Fecha de recepción: 22 de abril de 2006

Fecha de aceptación: 13 de octubre de 2006

**Palabras clave:** corriente pulsante inversa, cobre-níquel, electrorecubrimiento, corrosión.

**Keywords:** current pulsant inverse, copper-Nickel, electrodeposition, corrosion.

## RESUMEN

Este trabajo muestra el análisis de algunas propiedades de los electrorecubrimientos cobre-níquel, depositados sobre substratos de Zamak que fueron obtenidos con la técnica de Corriente Directa Convencional (DC) y comparados con los obtenidos mediante las técnicas de Corriente Pulsante Directa

(PDC) y Corriente Pulsante Inversa (PRC), implementadas en esta investigación. Las propiedades analizadas son rugosidad, microdureza, adhesión, brillo, análisis de resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión. Los electrorecubrimientos de níquel se obtuvieron empleando un baño tipo *Watt*.

## ABSTRACT

This paper shows the analysis of some properties of the copper-nickel electrodeposition on Zamak substrate, which was obtained with the technique of Conventional Direct Current (DC) and the techniques of Direct Current Pulsant (PDC) and

Inverse Current Pulsant (PRC), implemented in this research. The analysed properties were: ruggedness, microhardness, adherence, glossy, analysis of wear resistance and resistance to the corrosion. The nickel electrodeposition was obtained using the watt's bath type.

\* \* \*

## 1. Introducción

Los electrorecubrimientos con Corriente Pulsante (PDC) y Corriente Pulsante Inversa (PRC) son técnicas en las cuales la Corriente Estacionaria Directa (DC) son reemplazadas por sus formas modulares. Aunque ellas han sido reconocidas durante un largo periodo de tiempo, el método de electrorecubrimiento empleando corrientes moduladas permaneció inactivo; sólo la técnica PRC se ha usado ocasionalmente para la obtención de recubrimientos de cobre a partir de soluciones cianuradas [1].

Aunque se conocía que la morfología de los depósitos de oro y sus aleaciones se podían modificar con el uso de corriente pulsante inversa, esta atractiva ventaja sólo se desarrolló cuando se supo que los depósitos así obtenidos presentaban mejores propiedades para aplicaciones electrónicas que los obtenidos usando corriente directa [2].

La aplicación de la técnica de corriente pulsante ha permitido el mejoramiento de la calidad de un número importante de procesos industriales de electrodeposición. En comparación con los depósitos obtenidos por la técnica tradicional DC, mediante su uso es posible obtener recubrimientos de cobre, níquel y cinc a partir de soluciones de sulfato, así como recubrimientos de oro, cobre y latón, a partir de soluciones cianuradas, con igual o mejor calidad [3-5].

Dentro de las ventajas de la aplicación de la técnica PRC se encuentran:

- El uso de densidades de corriente y tiempos de proceso similares a lo utilizados con DC.

- La obtención de un tamaño de grano pequeño (grano fino) en el recubrimiento; esto permite un mayor cubrimiento del sustrato con la misma calidad del metal depositado, resultando en un decrecimiento de la porosidad, mayor resistencia superficial y mayor densidad del metal [6].
- El incremento en la compactación del metal depositado, esto se asocia con la disminución de las tensiones internas, el incremento en la ductilidad y los cambios en la dureza del recubrimiento obtenido [6].

El recubrimiento con la técnica PRC es un proceso de electrodeposición bipolar, en el cual la DC está cambiando permanentemente su dirección (polaridad). Su uso fue muy popular en la década del cincuenta; su mayor utilización estuvo en el mejoramiento de los niveles de acción en baños calientes de recubrimientos de cianuros de cobre; sin embargo, el uso de estos electrolitos fue drásticamente reducido, debido a problemas ambientales y, en consecuencia, esta técnica fue relegada a un segundo plano, así como su utilización en procesos de limpieza y pulido electrolítico. Durante cerca de veinte años no se registran otros estudios teóricos que aporten mayor conocimiento al respecto [7].

Ya en la década del setenta aparecen en la bibliografía nuevas contribuciones teóricas sobre la técnica, y en las décadas de ochenta y el noventa se demostró que ella podía constituirse en la respuesta a gran cantidad de problemas complicados que aún enfrenta la industria de los electrorecubrimientos.

En la electrodeposición de metales mediante la técnica PRC la electricidad  $q_c$ , que fluye a través de los electrodos durante el periodo catódico  $t_c$ , debe ser mayor que la cantidad de electricidad  $q_a$  que fluye durante el tiempo del periodo anódico  $t_a$ , es decir,  $i_c t_c > i_a t_a$ . En consecuencia, empleando este método de deposición la cantidad de electricidad total no es consumida en la formación del depósito; sólo una parte significativamente pequeña de la corriente es utilizada para la polarización anódica (a menudo denominada corriente de desprendimiento) de los productos recubiertos. Durante cada periodo total de recubrimiento con corriente inversa se forma una capa en la superficie de los productos de determinado espesor y, durante la polarización anódica ( $t_a$ ), parte de esa capa formada es disuelta nuevamente [8-9].

Los recubrimientos de cobre-níquel depositadas sobre sustratos de Zamak (Zn 67,1%; Al 26,9% y Cu 5,9%) ofrecen una variedad de aplicaciones decorativas, debido a los diferentes acabados que pueden lograrse a partir de ellas. En la actualidad, estas películas se obtienen empleando la técnica DC, presentándose una serie de dificultades relacionadas con la formación de la película y con su comportamiento, frente al fenómeno de corrosión en medios ácidos y de cloruros [10]. Esto ha motivado el estudio y empleo de otras técnicas alternativas de electrodeposición, entre ellas la PRC y la PDC, que pueden emplearse en gran variedad de metales y aleaciones.

Con la técnica PRC pueden obtenerse depósitos de mayor dureza, resistencia al desgaste, brillo, adhesión y menor rugosidad, en comparación con los depósitos obtenidos empleando PDC y DC. La evaluación del comportamiento del recubrimiento frente a la corrosión se realizó mediante la técnica de barrido potencio-dinámico, que indica la velocidad con la que el recubrimiento cobre-níquel se degrada en un medio dado; así se encontró que a menor velocidad de degradación, mayor confiabilidad del sistema.

## 2. Desarrollo experimental

Para la obtención de los electrorecubrimientos de Cu se empleó un electrolito alcalino (pH=11)

compuesto de NaCN (56g/L), CuCN (42g/L), KNaC<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O<sub>6</sub>\*4H<sub>2</sub>O (45g/L) y un abrillantador; la temperatura de trabajo fue de 35°C y el tiempo de proceso fue de 40 minutos. Los electrorecubrimientos de níquel se obtuvieron empleando un electrolito tipo Watt (pH=4,2) compuesto de NiSO<sub>4</sub>\*6H<sub>2</sub>O (300g/l), NiCl<sub>2</sub>\*6H<sub>2</sub>O (75 g/l), H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> (50 g/l) y aditivos para mejorar la apariencia del depósito; la temperatura de trabajo fue de 65°C y el tiempo de electrorecubrimientos fue de 75 minutos.

Los ensayos de electrorecubrimientos con DC, PDC y PRC se realizaron de manera dinámica, utilizando una celda con capacidad de 16 l y un tambor con capacidad de carga de 300g. Se emplearon como cátodos discos de Zamak y ánodos de cobre y níquel consumibles en cada uno de los procesos. Antes del proceso de cobrizado, los cátodos fueron sometidos a un proceso de limpieza con ultrasonido, un desengrase electrolítico y un decapado en ácido sulfúrico al 5% en volumen. Para la electrorecubrimientos del níquel se emplearon los sustratos de Zamak recubiertos con cobre.

En el diagrama 1 se muestra la metodología empleada en cada una de las técnicas estudiadas para la obtención de los electrorecubrimientos Cu - Ni.

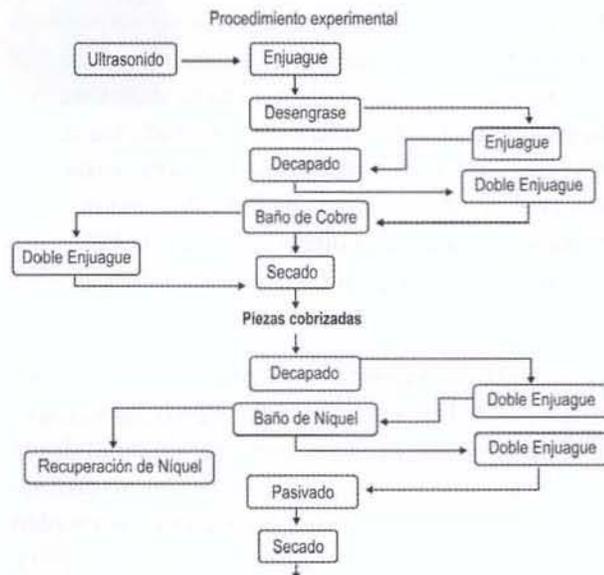


Diagrama 1. Metodología empleada en la obtención de películas delgadas Cu/Ni

Para la obtención de los electrorecubrimientos se construyó un equipo que permite realizar la inver-

sión de polaridad. Los parámetros involucrados y los rangos de trabajo empleados se muestran en la tabla 1.

Técnica		V <sub>on</sub> (V)	V <sub>off</sub> (V)	V <sub>rev</sub> (V)	t <sub>on</sub> (ms)	t <sub>off</sub> (ms)
DC	1	10	-	-	-	-
	2	8	-	-	-	-
PDC	1	10	2	-	100	100
	2	8	2	-	100	100
PRC	1	10	-	-2	100	10
	2	10	-	-4	100	10
	3	10	-	-2	100	40
	4	10	-	-4	100	40

**Tabla 1.** Parámetros utilizados para la obtención de los recubrimientos

La caracterización electroquímica de los electrorecubrimientos se llevó a cabo obteniendo curvas de polarización. Las pruebas se realizaron en una celda compuesta por tres electrodos, un electrodo de trabajo (probetas electrorecubiertas de cobre-níquel) con un área expuesta de 1 cm<sup>2</sup>, un electrodo de referencia de Ag/AgCl y un electrodo auxiliar de alambre de platino; también se empleó una solución de HCl al 1% de pH=5,6, preparada con agua destilada. La amplitud de la señal sinusoidal utilizada fue de 10 mV. Las curvas de polarización se obtuvieron con una velocidad de escaneo de 0,5 mV/s, un periodo de muestreo 0,2s, un voltaje inicial de -0,25 V y un voltaje final de 1V, con un área de exposición de 1 cm<sup>2</sup>.

La medida de rugosidad se realizó usando un Microscopio de Barrido por Sonda (SPM) *Park Scientific Instruments*, modelo *AutoProbe CP*, modo de microscopía de fuerza atómica en contacto (AFM-C). Para el tratamiento de las imágenes se empleó el programa *ProScan Image Processing (PSI)*, incorporado en el equipo. Los datos de rugosidad se obtuvieron sólo para el área de 5µm<sup>2</sup>.

Para la medición de la microdureza Vickers no hubo necesidad de realizar ningún tratamiento mecánico a las probetas; se utilizó el microdurómetro HV serie 1000; para hallar una medida de la microdureza se realizaron tres medidas con una carga de 4,9035 Newton, que luego fueron promediadas, en concordancia con las disposiciones de norma técnica ASTM F384 (*Test Method for Microhardness of Materials*).

Para la medida del brillo se utilizó un equipo construido bajo las especificaciones de la norma técnica ASTM E 430-78, que consta de dos lentes, un porta muestra, una bombilla de 150 Watt, una fuente de 30 A adaptada a la bombilla y un luxómetro. A mayor valor de luminiscencia registrado por el luxómetro, la probeta es excelente en cuanto a apariencia.

Las medidas de resistencia al desgaste se realizaron con base en la norma ASTM G83-96; la prueba consiste en poner la probeta en contacto con una esfera endurecida sobre los 70 Rockwell C que rota a 535 rpm. El contacto probeta-esfera se mantiene a través de un torque aproximado de 15lbs/pie, y el

tiempo de contacto metal-metal va de 20 a 120 seg., con suministro continuo de lubricante a la esfera. Como resultado del contacto esfera-probeta, sobre esta última se obtiene una huella cuya área da idea de la dimensión del desgaste: a mayor área de la huella mayor desgaste.

Para la determinación de la adhesión de los recubrimientos se seleccionó el método desarrollado y patentado por la firma *Daimler Benz* bajo la norma número 81, ejecutado aplicando el método Rockwell C. La prueba consiste en aplicar una carga de 150 kg sobre la superficie recubierta, con el indentador cónico de diamante 120° de apertura y una punta redondeada con un radio de 0,2 mm. Sobre la superficie de la muestra la carga aplicada origina una impresión con grandes tensiones inducidas de tracción y compresión a su alrededor, cuyo valor puede superar la energía de adhesión de la interfase sustrato-recubrimiento causando el desprendimiento en algunas zonas.

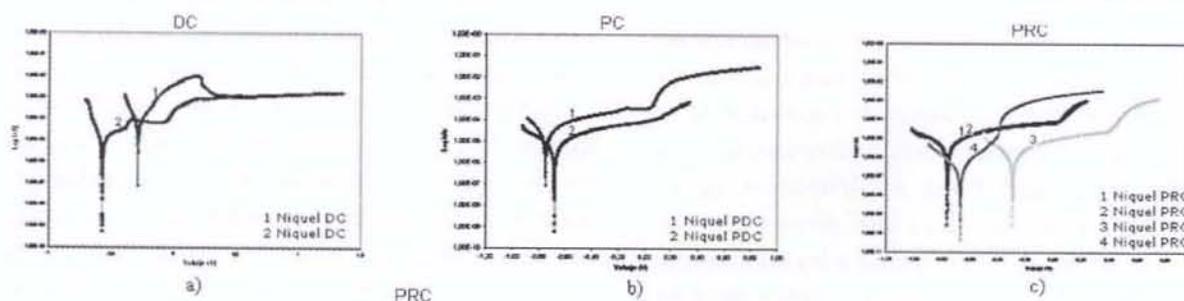
*Daimler Benz* es una compañía fabricante de autos que hace pruebas de calidad a los materiales que fabrica, en su mayoría objetos metálicos. Se consideró que su procedimiento es el más adecuado dado que no existe ninguna forma de realizar medidas cuantitativas de adhesión; sólo es posible hacer mediciones cualitativas, en su mayoría empleando tarjetas de comparación o alguna forma de rayado en las probetas. En este caso, por tratarse de recubrimientos duros, este método fue el más adecuado y produjo los buenos resultados que se describen más adelante.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Curvas de polarización

En la gráfica 1 se muestran los diagramas de Tafel correspondientes a los depósitos de níquel obtenidos empleando las técnicas DC, PDC y PRC. Las curvas de polarización obtenidas permiten encontrar los valores de las pendientes anódica y catódica en cada caso; ellos se muestran en las tablas 2, 3 y 4, junto con los valores de densidad de corriente y velocidad de corrosión para cada uno de los casos estudiados.

Los parámetros encontrados a partir de las curvas de polarización permiten hacer uso de la ecuación de *Stern-Geary*, para hallar las densidades de corriente de corrosión. Se determinó que la velocidad de corrosión más alta se hallaba en los electrodepósitos obtenidos con corriente directa a un voltaje de 10 V, encontrándose un valor de 18,52 mpy. Cuando se emplea PC, las condiciones de deposición empleadas no dejan observar un cambio significativo en el comportamiento frente a la corrosión de los depósitos, obteniéndose valores intermedios de 12,43 mpy. Con la técnica de PRC no se observó una influencia marcada del voltaje anódico en el grado de deterioro del depósito; sin embargo, el aumento del tiempo de pulso anódico genera un depósito con un tamaño de grano más refinado, un mayor grado de compactación, una mejor respuesta frente al ataque corrosivo estudiado y, como resultado, velocidades de corrosión muy reducidas, en comparación con las otras dos técnicas evaluadas (0,055 mpy y 0,097 mpy).



Gráfica 1. Curvas de polarización de electrorecubrimientos de níquel obtenidos con diferentes técnicas en HCl al 1% a una velocidad de barrido de 0.5 mV/s. a) DC, b) PDC y c) PRC

Caracterización de electrorecubrimientos cobre-níquel sobre sustratos de Zamak utilizando corrientes pulsantes con y sin inversión de polaridad

Parámetro	Prueba	
	1	2
$\beta_1$ (mV/década)	133.9	212.9
$\beta_2$ (mV/década)	89.50	79.90
$i_{corr}$ ( $\mu$ A)	60.30	8.210
Velocidad de corrosión (mpy)	18.52	6.554

**Tabla 2.** Valores de corriente y velocidad de corrosión de las probetas DC

Parámetro	Prueba	
	1	2
$\beta_1$ (mV/década)	496.6	306.3
$\beta_2$ (mV/década)	270.8	312.4
$i_{corr}$ ( $\mu$ A)	40.50	34.50
Velocidad de corrosión (mpy)	12.43	10.61

**Tabla 3.** Valores de corriente y velocidad de corrosión de las probetas PDC

Parámetro	Prueba			
	1	2	3	4
$\beta_1$ (mV/década)	276.6	891.1	68.20	78.92
$\beta_2$ (mV/década)	239.1	890.9	73.00	86.56
$i_{corr}$ ( $\mu$ A)	7.08	15.90	0.069	0.078
Velocidad de corrosión (mpy)	0.15	0.56	0.055	0.097

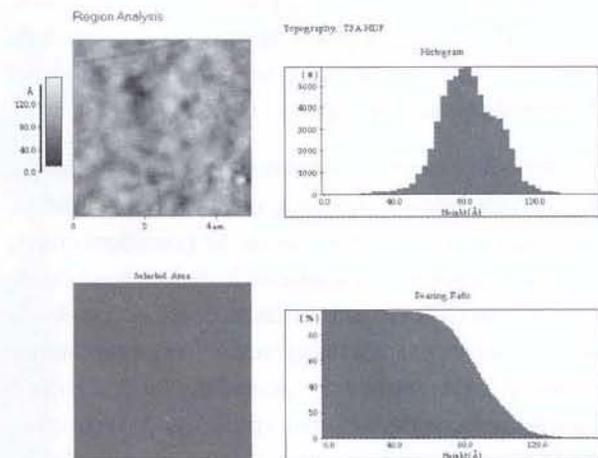
**Tabla 4.** Valores de corriente y velocidad de corrosión de las probetas PRC

### 3.2. Rugosidad

En la gráfica 2 se observan algunas imágenes del programa *ProScan Image Processing* que fue utilizado para obtener los valores de rugosidad de los electrorecubrimientos; en la tabla 5 se muestran los valores de rugosidad. Puede resaltarse que las probetas obtenidas con la técnica PRC ofrecen el menor valor de rugosidad, con respecto a las tratadas con DC y PDC; además, el valor es menor para los electrorecubrimientos obtenidos con mayor voltaje anódico y menor valor de tiempo anódico.

Técnica	Valor de rugosidad (°)	
DC	1	461
	2	348
PDC	1	347
	2	241
PRC	1	167
	2	197
	3	225
	4	252

**Tabla 5.** Medida de la rugosidad de las probetas cobre – níquel.



**Gráfica 2.** Medida de rugosidad obtenida con el programa ProScan Image Processing para un área de  $5\mu\text{m}^2$

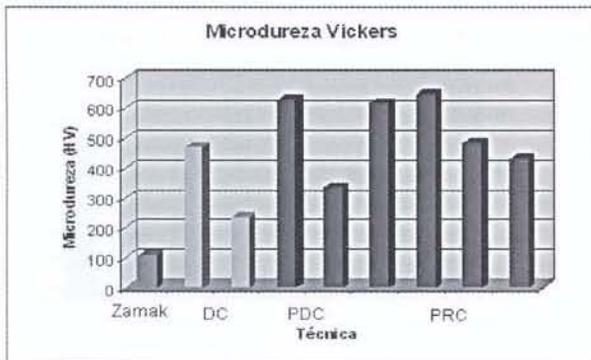
La rugosidad es un parámetro importante en este trabajo, dado al terminado que quiere darse a las piezas obtenidas. El análisis anterior indica que las piezas más homogéneas se obtuvieron con la técnica PRC; la existencia de un voltaje y tiempo anódico son los responsables de esta topografía, que tiene un valor pequeño de rugosidad. Las piezas obtenidas con la técnica DC tienen un valor alto de aspereza; esto se observa a simple vista y se debe a la cantidad de masa que se deposita en forma heterogénea ( $50\ \mu\text{m}$  aproximadamente).

### 3.3. Microdureza Vickers

Las pruebas de microdureza *Vickers* son un método apropiado en el marco de este análisis, dado que puede obtenerse con certeza el valor de microdureza del recubrimiento y no el del sustrato. La microdureza *Vickers* del sustrato es de 107 HV; a partir de este valor se obtuvieron las demás medidas, correspondientes a las probetas de cobre-níquel obtenidas con las técnicas DC, PDC y PRC (véase tabla 6). En la figura 1 y en la gráfica 3 se observa que las probetas obtenidas con la técnica PRC presentan el mayor valor de microdureza, con respecto a las demás. La probeta con el mayor valor de microdureza se obtuvo con los siguientes parámetros: voltaje On 10V, voltaje Off -4V, tiempo On 100ms y tiempo Off 10ms; estos valores pueden deberse a la diferencia del tamaño del grano y a su acomodación.

Técnica		Valor de microdureza (HV)
DC	1	469
	2	234
PDC	1	626
	2	335
PRC	1	616
	2	644
	3	485
	4	429

Tabla 6. Medida de la microdureza Vickers de las probetas cobre-níquel.



Gráfica 3. Comparación de la microdureza del níquel obtenida con las tres técnicas versus el sustrato

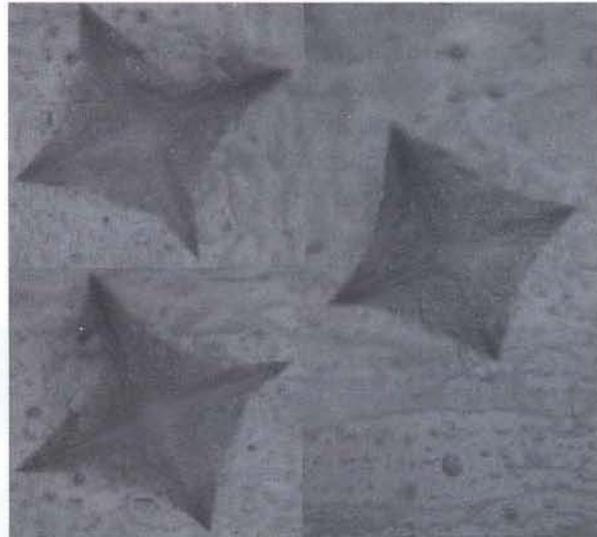


Figura 1. Huellas de la indentación tomadas a 400 X sobre la superficie de las probetas cobre-níquel

El valor de microdureza está ligado al tamaño de grano [6]; este último varía dependiendo de la técnica utilizada; así, cuando se emplea la técnica de DC el valor es grande y éste disminuye al utilizar técnicas pulsantes. También es conocido que el tamaño de grano es el responsable de casi todas las propiedades mecánicas que se estudian, como en este caso la microdureza.

### 3.4. Análisis de la resistencia al desgaste

La prueba de resistencia al desgaste es importante debido a que las piezas de cobre-níquel obtenidas en este trabajo serán sometidas a rozamiento, erosión, o simplemente desgaste por uso diario. Los resultados de las pruebas de desgaste sobre las probetas de cobre-níquel muestran que las obtenidas con la técnica PRC ofrecen el menor valor de desgaste, con respecto a las tratadas con las técnicas DC y PDC.

En la figura 2 se observan 3 micrográficas tomadas a 50X correspondientes a las probetas obtenidas con las técnicas PRC, PDC y DC. En su orden, las huellas de desgaste obtenidas tienen diámetros de circunferencia de 1.246  $\mu\text{m}$ , 1.450  $\mu\text{m}$  y 1.650  $\mu\text{m}$ .

µm, para un tiempo de 60 s. El diámetro de circunferencia es directamente proporcional al desgaste producido; los resultados son coherentes con los obtenidos, con respecto a la microdureza y la rugosidad; así, las probetas obtenidas con la técnica DC tienen baja microdureza y alta rugosidad. Esto puede estar relacionado con el tamaño de grano; el gran tamaño de los granos producidos con esta

técnica generaría el alto valor de rugosidad y desgaste; asimismo, a mayor tamaño de grano menor oposición al desgaste. Lo contrario sucede con las otras dos técnicas: la forma modular de la onda utilizada en estos casos permite obtener un tamaño de grano más refinado y, por tanto, mayor microdureza, menor rugosidad y, como consecuencia, menor valor de desgaste.

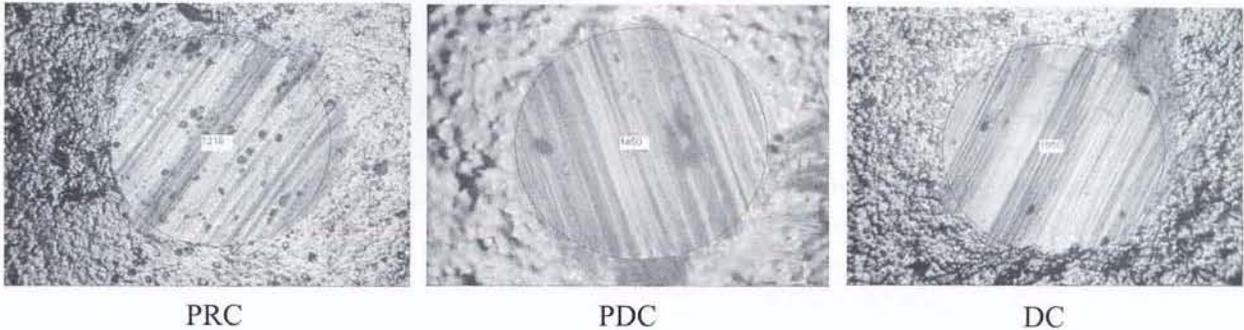


Figura 2. Huellas de desgaste de la probetas Cu-Ni tomadas a 50X

### 3.5. Brillo

Las superficies lisas, es decir, con los menores valores de rugosidad, tienen un mayor brillo, pues los rayos luminosos que caen sobre ellas se reflejan prácticamente con el mismo ángulo con que lo harían en un espejo, por tanto, no hay dispersión de luz. En la tabla 7 se muestran las medidas de brillo para las probetas obtenidas con las técnicas DC, PDC y PRC; la técnica PRC ofrece el mayor brillo, con los siguientes parámetros: Voltaje On 10V, voltaje Off -2V, tiempo On 100ms y tiempo Off 10ms; en contraste, la técnica DC ofrece el menor valor de brillo. Para medir el brillo reflejado por las probetas de cobre-níquel se implementó el sistema mostrado en la figura 3; en la gráfica 4 se observa la comparación de las medidas de brillo en función de la técnica.

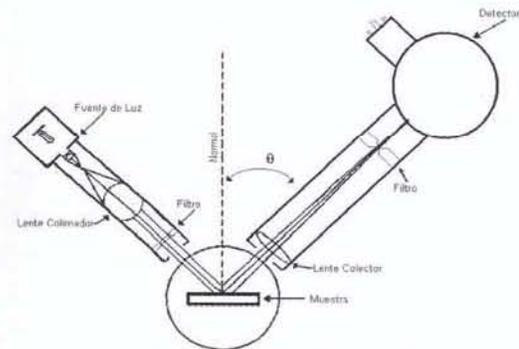
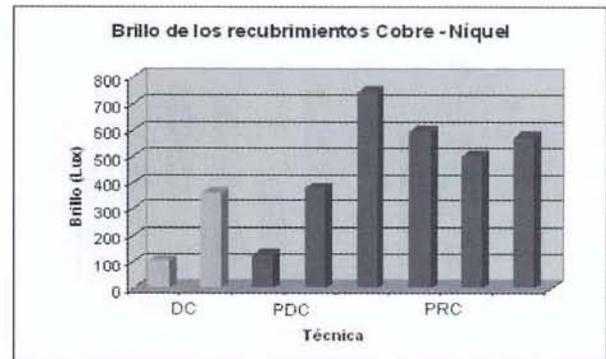


Figura 3. Esquema de goniómetro construido para la medida de brillo



Gráfica 4. Comparación de las técnicas con la medida de brillo

Técnica	Brillo (Lux)
DC	1 105
	2 362
PDC	1 126
	2 383
PRC	1 749
	2 595
	3 503
	4 573

Tabla 4. Valores de brillo para las probetas obtenidas con las técnicas DC, PDC y PRC.

Cuando se emplearon las técnicas DC y PDC, las probetas obtenidas con un alto voltaje catódico son las más opacas; esto se debe a que son las que tienen mayor cantidad de masa aglomerada depositada, es decir, se obtuvieron con una densidad de corriente alta. Este fenómeno no se presenta con las probetas obtenidas con la técnica PRC, debido a que en ella existe una disolución anódica, en una etapa en la cual la masa aglomerada es retirada, quedando adherida a la probeta sólo la masa bien depositada; así se genera un depósito homogéneo y liso.

### 3.6. Adhesión

La medida de adherencia obtenida en este trabajo fue de tipo cualitativo, pues hasta ahora no se ha

logrado encontrar un procedimiento cuantitativo satisfactorio para determinarla. El grado de adhesión de los electrorecubrimientos obtenidos con PRC es de tipo G1, lo que indica que la superficie es totalmente lisa, sin cuarteamiento del recubrimiento, sin desprendimiento del recubrimiento y sin hundimiento de la superficie. El valor de adhesión de las probetas obtenidas con la técnica PDC es de tipo G2, pues se observa la presencia de grietas alrededor de las huellas con escaso cuarteamiento del recubrimiento; el valor correspondiente de las probetas obtenidas con la técnica DC es de grado G3, lo que indica la presencia de mayor número de grietas y cuarteamiento alrededor de la huella (figura 1 y gráfica 3).

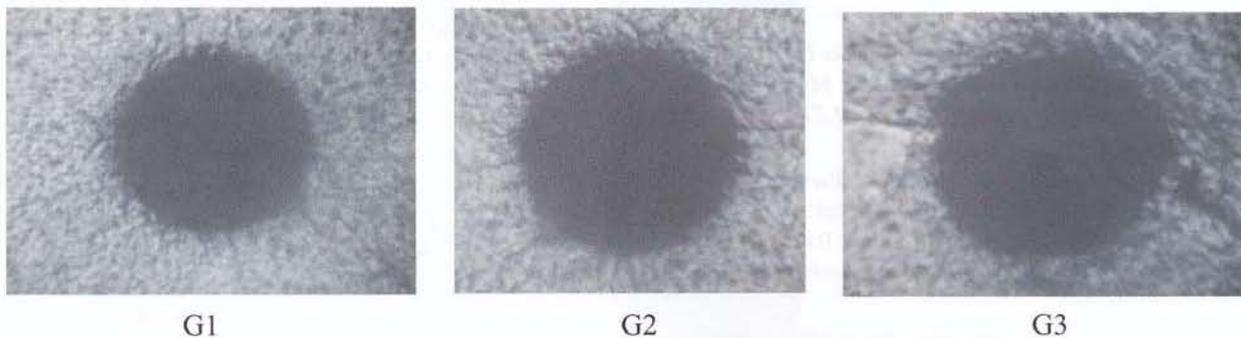


Figura 4. Análisis de adherencia para las probetas de níquel obtenidas con las tres técnicas

El análisis de adhesión es importante en este experimento, porque aquí se están obteniendo recubrimientos bicapas, es decir, sobre el sustrato se depositan dos capas de diferente metal. La capa de cobre contribuye a la unión apropiada entre el sustrato y el níquel; este último es el terminado que se desea obtener.

La adhesión está altamente relacionada con las tensiones internas de cada probeta: a mayor grado de adherencia mayor tensión interna. En este estudio ella se relaciona con la velocidad de corrosión, medida a partir de las curvas de polarización; con el uso de la técnica DC se obtuvo el valor más alto de degradación del material (grado 3 de adhesión); aunque este grado aún representa una buena adhesión, la degradación del material es la más alta por

la presencia de agrietamientos generados por la aplicación de una carga; la técnica PRC (grado 1 de adherencia) no genera agrietamientos como respuesta a la misma carga y, por tanto, ofrece el valor más bajo de degradación de la capa de níquel.

### 4. Conclusiones

- La microdureza *Vickers* de las probetas cobre-níquel obtenidas con la técnica PRC es dos órdenes de magnitud mayor que la obtenida con la técnica convencional DC, y siete órdenes de magnitud mayor con respecto al sustrato.
- Las probetas obtenidas con la técnica PRC ofrecen el menor valor de rugosidad, esto es, la mayor homogeneidad del recubrimiento.

- El análisis de brillo de las probetas permite señalar que los depósitos de cobre-níquel obtenidos con la técnica PRC son los que presentan un grado elevado de reflectancia especular, en comparación con las otras dos técnicas.
- El grado de adherencia de los depósitos obtenidos con las tres técnicas es bueno, pero la técnica PRC obtuvo la mayor calificación cualitativa; los depósitos con la mayor resistencia al desgaste son los obtenidos con la técnica PRC, debido a la elevada microdureza de estos electrorecubrimientos.
- A partir de las curvas de polarización *Tafel* pudo establecerse que los depósitos de cobre-níquel obtenido con la técnica PRC presentan menor velocidad de corrosión, en comparación con los obtenidos mediante las otras dos técnicas, bajo parámetros de voltaje y tiempo anódicos altos y voltaje y tiempo catódico bajos.

---

## Referencias bibliográficas

---

- [1] Khorasani S, Motieifar A, Rashidian B. (2002). "Optimal Pulse Shapes for Periodic Reverse Electroplating". *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction, pp. 35-42
- [2] Valizadeh S, Svedberg E.B, Leisner P. (2002). "Electrodeposition of Compositionally Modulated Au/Co alloy layers". *Journal of Applied Electrochemistry*, pp. 97-104
- [3] Ashassi-Sorkhabi H, Hagrah A, Parvini-Ahmadi N, Manzoori J. (2001). "Zinc-Nickel Alloy Coatings Electrodeposited from a Chloride Bath Using Direct and Pulse Current". *Surface and Coatings Technology*, pp.278-283
- [4] Chi-Chang Hu, Chi-Ming Wu. (2003). "Effects of Deposition Modes on the Microstructure of Copper Deposits from an Acidic Sulfate Bath". *Surface and Coatings Technology*, pp. 75-83
- [5] Stankeviciute A, Leinartas K, Bikulcius G, Virbalyte D. (1998). "Deposition of Zn-Co by Constant and Pulsed Current". *Journal of Applied Electrochemistry*, pp.89-95.
- [6] Wong K.P, Chan K.C, Yue T.M. (2001). "Study of Hardness and Grain Size in Pulse Current Electroforming of Nickel Using Different Shaped Waveforms". *Journal of Applied Electrochemistry*, pp. 25-34
- [7] Lowenhweim F. (1963). *Modern Electroplating*. John Wiley & Sons, New York, cap. 4.
- [8] Landolt D, Marlot A. (2003). "Microstructure and Composition of Pulse-Plated Metals and Alloys". *Surface and Coatings Technology*, pp.169-170.
- [9] Paunovic M, Schlesinger M. (1998). *Fundamentals of Electrochemical Deposition*. John Wiley & Sons, New York, p. 103.
- [10] Tsai W-C, Wan C-C, Wang Y-Y. (2002). "Mechanism of Copper Electrodeposition by Pulse Current and its Relation to Current Efficiency". *Journal of Applied Electrochemistry*, pp.1371-1378,