



Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia

ISSN: 0120-6230

revista.ingenieria@udea.edu.co

Universidad de Antioquia

Colombia

Ruiz, Jairo; Parra, Carlos Mario; Bustamante, Carlos Mario; Vélez, Elkin; Rivera, Luis Alfonso  
Modelamiento del proceso de recubrimiento de instrumental quirúrgico con cromoduro  
Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 30, diciembre, 2003, pp. 89-94  
Universidad de Antioquia  
Medellín, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## Modelamiento del proceso de recubrimiento de instrumental quirúrgico con cromoduro

Jairo Ruiz\* \*\*, Carlos Mario Parra \*\*, Carlos Mario Bustamante \*\*, Elkin Vélez \*\*, Luis Alfonso Rivera \*\*

(Recibido el 29 de noviembre de 2002. Aceptado el de 30 de abril de 2003)

### Resumen

En este artículo se presenta un modelo estadístico que describe el comportamiento de la variable respuesta espesor del recubrimiento de cromoduro en los portaguas quirúrgicos, de acero inoxidable martensítico, como función del tiempo de exposición, la densidad de corriente y la temperatura; el modelo fue ajustado por medio de un diseño experimental rotacional compuesto de segundo orden.

El modelo tiene un poder de explicación del 75% en la variabilidad de la respuesta, que se considera muy satisfactorio dada la complejidad del proceso.

----- *Palabras clave:* modelo estadístico, cromoduro, espesor, dureza vickers.

## Modelling of the coating process on surgical instrumentation with hard chromium

### Abstract

This paper presents a statistical model useful in describing the behavior of stainless steel surgical needle holders, with a hard chromium coating, in relation to time of exposure, flow density and temperature variables. It is adjusted by a second order rotational compound experimental design.

The proposed model accounts for 75% of the total of the observed responses and due to the complexity of the process involved, it is considered as very satisfactory.

----- *Key words:* Statistical model, hard chromium, thickness, vickers hardness.

---

\* Grupo de Corrosión y Protección. Universidad de Antioquia. [corrosion.ingenieria@udea.edu.co](mailto:corrosion.ingenieria@udea.edu.co).

\*\* Grupo Ciencia y Tecnología Biomédica (CTB). Facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. [ctb.ingenieria@udea.edu.co](mailto:ctb.ingenieria@udea.edu.co), [jruiz@udea.edu.co](mailto:jruiz@udea.edu.co).

## Introducción

El sector hospitalario no es ajeno a la crisis financiera que vive el país y cada día es más difícil que todo colombiano tenga acceso a los servicios de salud y que éstos sean de la mejor calidad. Por ello, es necesario desarrollar estrategias que motiven la realización de investigaciones en el sector, para que los procesos sean más eficientes, y haya innovación en otros que signifiquen generación de riqueza. Es el caso del instrumental quirúrgico, en cuyo inventario nacional se ha hecho indudablemente una gran inversión, suministrado por las empresas extranjeras en su gran mayoría, lo que contribuye a elevar los costos del mismo.

El diseño metodológico para la conservación y el manejo óptimos del instrumental derivará en un aumento del tiempo de vida del mismo, con el consiguiente beneficio económico; igualmente, cuando el estado del instrumental exige su retiro por efectos de la corrosión, el proceso de recubrimiento con cromoduro que se implementó, permite volverlo a utilizar, lo cual representará un ahorro considerable en el campo del instrumental que se puede destinar a cubrir otras carencias del sector.

Éstos fueron los propósitos básicos de la investigación “Recuperación y control de la corrosión en instrumental quirúrgico con recubrimientos de cromoduro” desarrollado por los grupos Ciencia y Tecnología Biomédica (CTB) y Corrosión y Protección, de la Universidad de Antioquia.

## Metodología experimental

La metodología experimental para cumplir con el objetivo específico de modelar el proceso de recubrimiento con cromoduro, está soportada en un diseño de superficie de respuesta [1], el cual permite modelar y analizar procesos en los cuales una respuesta de interés es influida por varios factores. Para el caso de tres factores de importancia,  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ , la superficie de respuesta para la variable respuesta,  $Y$ , se representa por:

$$E(Y) = f(X_1, X_2, X_3)$$

Para aproximarse a la anterior superficie se empleó un modelo estadístico rotacional compuesto de segundo orden, en el cual las condiciones experimentales vienen dadas por las condiciones de un factorial  $2^K$ , donde  $K = 3$  es el número de factores, más  $2K$  puntos axiales y una más en el centro del espacio experimental. En ese centro se hacen entre cuatro y seis réplicas para estimar la varianza y poder evaluar la significancia de los factores; en las demás condiciones no se hacen réplicas. El número de observaciones realizadas en el centro fue de cuatro, por tanto el total de ellas es de 18.

La superficie se aproxima, entonces, por medio del anterior modelo, por la siguiente relación funcional:

$$E(Y) = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i X_i + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^L \beta_{ij} X_i X_j$$

Donde  $\beta_i$  y  $\beta_{ii}$  informan, respectivamente, sobre los efectos lineal y cuadrático del factor  $X_i$  y  $\beta_{ij}$  y sobre la interacción de los factores  $X_i$  y  $X_j$ .

La estimación de los parámetros del modelo y el ajuste de la superficie de respuesta conjugó procedimientos estadísticos y matemáticos incorporados en *softwares* especializados; para este caso es el Statgraphics.

De acuerdo con Massuet [2], para una concentración constante de la solución de 250 g/L de ácido crómico y 2,5 g/L de ácido sulfúrico, los factores de mayor importancia para lograr un recubrimiento brillante y de buenas características físico-químicas son: el tiempo de exposición de la pieza en la solución de cromoduro, la densidad de la corriente aplicada y la temperatura del baño. El autor recomienda trabajar con una temperatura alrededor de 50 °C y con una densidad de corriente entre 40 y 55 A/dm<sup>2</sup>, como producto de sus investigaciones con aceros en general. Con esta información y de acuerdo con el diseño seleccionado, los rangos experimentales para los

factores fueron los siguientes: densidad de corriente de 22 a 61 A/dm<sup>2</sup>, la temperatura de 41 a 58 °C y se trabajó con un tiempo de exposición entre 16 y 84 min., esperando lograr unos espesores alrededor de quince micras, considerado como espesor suficiente para las condiciones de uso de la pinza quirúrgica de acero inoxidable martensítico, que es el material experimental.

### Resultados y análisis

La variable respuesta básica para el estudio fue el espesor, cuyo valor se determinó para cada pinza como el mínimo de los valores medidos en tres puntos definidos de la pieza. Dichos puntos fueron medidos siempre en la misma zona para cada pieza. En la tabla 1 se muestran los resulta-

dos experimentales obtenidos en las diferentes condiciones del diseño experimental aplicado.

Los resultados de la tabla 1 se procesaron mediante el paquete estadístico Statgraphics. Luego de un análisis estadístico y técnico, se depuró el modelo y se obtuvieron los resultados para el modelo seleccionado, los que se presentan en la tabla 2.

En la tabla 2 se observa que los factores de mayor incidencia en el espesor del recubrimiento son el tiempo de exposición y la densidad de corriente (valores  $p < 0,05$ ). Aunque la temperatura no es significativa estadísticamente, sí lo es para la cinética del proceso, y de ahí su inclusión en el modelo final. Es de observar, tam-

**Tabla 1** Resultados experimentales

<i>Tiempo de exposición (minutos)</i>	<i>Densidad de corriente (A/dm<sup>2</sup>)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Espesor promedio (micras)</i>
50,00	41,67	50,00	8,12
70,00	53,03	45,00	21,31
50,00	41,67	50,00	8,12
70,00	30,30	55,00	16,73
16,36	41,67	50,00	5,58
50,00	41,67	50,00	10,52
50,00	60,78	50,00	12,36
50,00	41,67	41,60	14,20
83,64	41,67	50,00	22,41
70,00	30,30	45,00	13,23
50,00	22,55	50,00	10,91
30,00	53,03	45,00	11,62
30,00	53,03	55,00	12,80
70,00	53,03	55,00	17,70
30,00	30,30	45,00	8,44
50,00	41,67	50,00	11,49
50,00	41,67	58,41	11,63
30,00	30,30	55,00	7,67

**Tabla 2** Análisis de varianza para el espesor

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Media de cuadrados	F-cal	P-Valor
A: tiempo de exposición	235,78	1	235,78	43,96	0,00
B: densidad de corriente	28,70	1	28,70	5,35	0,04
C: temperatura	1,18	1	1,18	0,22	0,65
AA	23,96	1	23,96	4,47	0,05

*R-cuadrado* = 80,60%

*R-cuadrado ajustado* = 74,63%

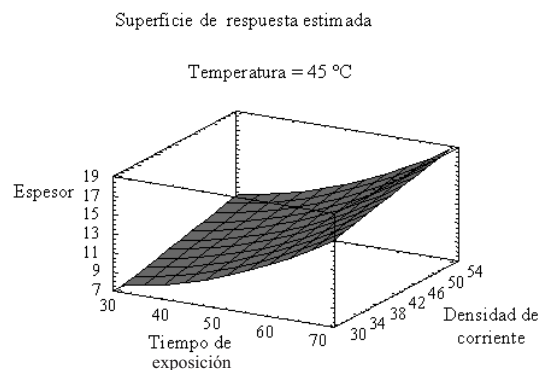
bién, que el tiempo de exposición tiene además del lineal un efecto cuadrático importante sobre el espesor, el cual se visualiza en las figuras 1, 2 y 3.

La figura 4 ilustra que los factores densidad de corriente y tiempo de exposición tienen un efecto lineal sobre el espesor; es de resaltar que la temperatura presenta una pendiente decreciente muy leve, que estadísticamente es cero, lo cual indica una baja influencia sobre la obtención de un espesor determinado. El tiempo de exposición tiene, además, un efecto cuadrático sobre la variable respuesta, lo que representa mayor

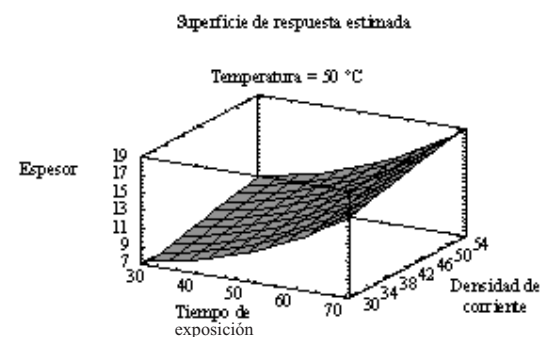
espesor a mayor tiempo. Todo lo anterior es válido para los diferentes rangos seleccionados en cada uno de los factores.

### Análisis de las superficies de respuesta

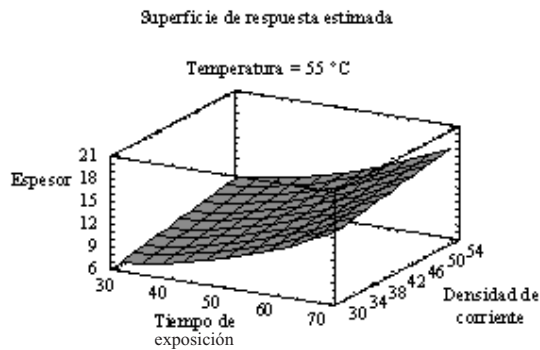
La metodología aplicada en el proyecto permite representar gráficamente el espesor como una superficie sólida en un espacio tridimensional, como se muestra en las figuras 1, 2 y 3. En éstas se grafica el espesor contra el tiempo de exposición y la densidad de corriente, a niveles de temperatura predeterminados.



**Figura 1** Comportamiento del espesor al variar el tiempo de exposición y la densidad de corriente a una temperatura de 45 °C



**Figura 2** Comportamiento del espesor al variar el tiempo de exposición y la densidad de corriente a una temperatura de 50 °C



**Figura 3** Comportamiento del espesor al variar el tiempo de exposición y la densidad de corriente a una temperatura de 55 °C

En las figuras 1, 2, 3 se observa que a bajos tiempos de exposición hay crecimiento lento de la película, pero a tiempos mayores la tasa de deposición aumenta, debido al efecto cuadrático del anterior factor, lo cual se cumple en bajas y en altas densidades de corriente.

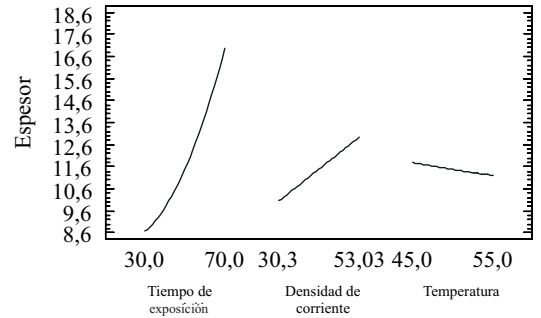
El modelo ajustado que describe el espesor del recubrimiento, viene dado por una expresión polinomial de segundo orden sobre las variables o factores presentados en la tabla 2. El modelo de regresión encontrado fue:

$$\begin{aligned} \text{Espesor} = & 7,01295 - 0,123637 * \text{tiempo de exposición} + \\ & 0,12756 * \text{densidad de corriente} \\ & - 0,0589039 * \text{temperatura} + \\ & 0,00331388 * \text{tiempo de exposición}^2 \end{aligned}$$

El ajuste anterior explica aproximadamente el 75% de las variaciones observadas en la variable respuesta espesor del recubrimiento, resultado que puede considerarse como muy satisfactorio dada la complejidad del proceso y que no contradice las recomendaciones técnicas dadas por los expertos en el área [2, 3, 4, 5, 6].

### **Análisis del brillo y la dureza**

Las pinzas quirúrgicas que fueron suministradas por el Hospital San Vicente de Paúl y el Hospital

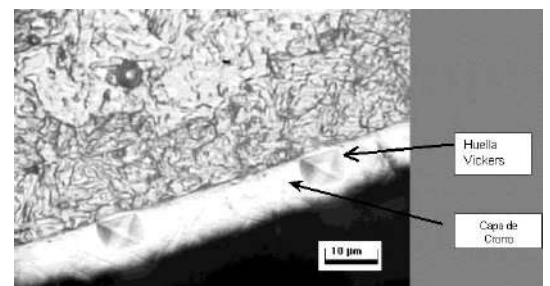


**Figura 4** Principales efectos del tiempo de exposición, densidad de corriente y temperatura sobre el espesor de la película de cromo

General, tenían diferentes formas de corrosión, como manchas, rayas y marcas que, en su conjunto, le daban un color mate al instrumental.

Todas las muestras recuperadas mediante el recubrimiento con cromoduro, al pulirse mecánicamente, presentan visualmente alto brillo, igual al que presenta el instrumental de acero inoxidable nuevo.

También se obtuvieron durezas en el rango de 800 a 1.000 vickers, que son completamente aceptables para el uso de los portaguas recuperados.



**Figura 5** Imagen digital de la sección de una pinza recubierta con cromoduro; muestra el espesor de la capa de recubrimiento y las huellas del ensayo de microdureza. 500X

Los portagujas recuperados mediante el recubrimiento de cromoduro presentaron un muy buen brillo y acabado superficial. Este material fue sometido a esterilización en vapor a una temperatura de 134 °C, trece minutos de exposición, veinte de secado y a una presión de 136 psi. Dicha prueba fue realizada en la unidad de esterilización del Hospital San Vicente de Paúl, de Medellín, Colombia. Los expertos en el tema resaltaron el excelente comportamiento del instrumento a dicho proceso.

### Conclusiones

El diseño rotacional de segundo orden aplicado en esta investigación mostró un comportamiento satisfactorio para la modelación de la variable respuesta, espesor del recubrimiento de cromoduro, en función de la densidad de corriente, el tiempo de exposición y en menor medida la temperatura, en el intervalo experimental estudiado.

El empleo de los diseños experimentales constituye un medio determinante para caracterizar los procesos electrolíticos en general, ya que se basan esencialmente en los mismos factores considerados en la presente investigación.

Se obtuvieron resultados positivos con respecto a la viabilidad técnica de recubrir el acero inoxidable martensítico con capas delgadas de cromoduro, que presentaron buen acabado superficial, buen brillo y buena dureza.

Un gran aporte del proyecto fue el diseño, implementación y puesta a punto de la planta piloto de cromoduro.

### Recomendaciones

- Es importante estudiar las zonas de baja densidad de corriente en el rango de 8 a 15 A/dm<sup>2</sup> aproximadamente, sugeridas por la literatura italiana, y confirmadas por algunos ensayos realizados al final de este proyecto, los cuales presentaron resultados halagüeños; además se tendría un ahorro significativo de energía y dinero.
- Son prometedores los resultados para hallar, en futuras experimentaciones, un modelo estadístico con poder de explicación superior al encontrado y en una zona experimental ampliada.
- Confrontar el modelo de pronóstico obtenido mediante el análisis estadístico, en el ámbito industrial; con miras a generar un programa de cálculo que permita agilizar el costo de recubrir una o varias piezas en diferentes niveles de las variables analizadas.

### Referencias

1. Montgomery, Douglas. *Diseño y análisis de experimentos*. Grupo Editorial Iberoamericana. México. 1991.
2. Massuet, Vicente. *Cromado duro*. Madrid. 1957.
3. Chessin, Hyman. "Hard Chromium Plating". En: *Metal Handbook*. New York. Vol. 5. 1987. pp. 170-188.
4. "Problems related to burnt and pitted deposit in chromium electroplating". En: *Metal Finishing*. New York. No. 1, 3, 5. Vol. 98. 2000.
5. Newby, Kenneth. "Functional Chromium Plating". En: *Metal Finishing*. New York. 1998. pp. 223-232.
7. Setien, J. *et al.* "Procesos de cromado duro". En: *Revista de Ingeniería Química*. Barcelona, octubre, 1992. pp. 97-103.