

Modelo predictivo de la rugosidad y porosidad en aluminio Al3003-B14 y Al6063-T6 anodizado usando análisis multi-factorial

Roughness and porosity prediction model of Al3003-B14 and Al6063-T6 aluminum anodized using multi-factorial analysis

Vergara, Leonardo¹; Nerey, Luis¹ y Guédez Victor²

¹Facultad de Arquitectura y Diseño. Escuela de Diseño Industrial. ULA

²Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica ULA

Mérida, 5101, Venezuela

lvergara@ula.ve

Resumen

En esta investigación se modela, a partir de los parámetros del proceso, la rugosidad y la porosidad de los aluminios Al3003 y Al6063 anodizados. Para ello, se realizaron estudios de la rugosidad y la porosidad de la superficie anodizada, utilizando técnicas de análisis multifactorial. Se establecieron los siguientes niveles de los parámetros del proceso: temperatura [15°C, 25°C], tiempo [30min; 60min], concentración de electrolito [1,2M; 2M], densidad de corriente [1Amp/dm², 3Amp/dm²], aluminio [Al3003, Al6063], y la deformación plástica [0%, 10%, 20%, 30%] como variable de ruido. Se propuso un diseño fraccionado 27-2 mixto, con el cual se ejecutaron un total de 48 pruebas usando soluciones electrolíticas de ácido sulfúrico. La medición de rugosidad Ra se realizó con un rugosímetro MITUTOYO SJ-201P; y la porosidad se caracterizó mediante microscopía electrónica. A los resultados se les realizó un análisis de varianza (ANOVA), para determinar los factores significativos y la robustez de los efectos. Se encontraron resultados de rugosidad [μm] (0,45-3,28); y porosidad [poros] (410,72- 982,26). Finalmente, se muestran los modelos de predicción de cada una de las respuestas en función de los parámetros significativos, estas ecuaciones permitirán predecir la rugosidad, y la porosidad de la capa de óxido de acuerdo a los requerimientos del producto, por medio de la selección apropiada de los parámetros del proceso.

Palabras clave: aluminio, anodizado, diseño factorial, ANOVA, robustez.

Abstract

In this research, roughness and porosity of anodized Al3003 and Al6063 aluminum are modeled based on the parameters of the process. For this, studies of the roughness and porosity of the anodized surface were made, using multi-factorial analysis techniques. The following levels were established for the parameters of the process: temperature [15°C, 25°C], time [30min; 60min], electrolyte concentration [1,2M; 2M], density flow [1Amp/dm²; 3Amp/dm²], aluminum [Al3003, Al6063], and the plastic deformation [0%, 10%, 20%, 30%] as a noise parameter. A mixed fractional design 27-2 was proposed, and with it, a total of 48 tests were performed using sulfuric acid electrolytic solutions. The measurement of roughness Ra was made with a MITUTOYO SJ-201P surface roughness tester; and electron microscopy was used to characterize the porosity. In order to determine the significant factors and the robustness of the effects in the results, variance analysis (ANOVA) was applied. Roughness [μm] (0,45-3,28) and porosity [pores] (410.72 - 969.52) results were found. Finally, the prediction models of each one of the answers in function to the significant parameters are shown, these equations will allow to predict the roughness and porosity of the oxide layer according to the product's requirements, by the appropriate selection of the parameters of the process.

Key words: aluminum, anodizing, factorial design, ANOVA, robustness.

1 Introducción

El anodizado es un proceso de oxidación, en el que la superficie de la pieza se convierte en una capa dura y porosa de óxido, la cual es permanente e integral con el metal base original y protege la pieza, parte o componente de aluminio, contra los agentes atmosféricos de oxidación y corrosión; genera resistencia a la abrasión y desgaste; se puede pigmentar, y además, carece de toxicidad tanto en medicina como en la industria alimentaria (Feliu y col., 2008; Bai y col., 2008; Konieczny y col., 2004). Este proceso, fue desarrollado para tratar el aluminio, el cual tiene características y propiedades mecánicas, físicas y químicas que lo hace una opción de selección muy adecuada para fabricar productos con determinados requerimientos de diseño. No obstante, muchas de estas características se podrían mejorar a través de un proceso de acabado superficial de anodizado. Sin embargo, en los aluminios Al3003 y Al6063, no se tienen referencias de combinaciones detalladas de parámetros del proceso, con las cuales se puedan establecer rangos para obtener características o propiedades específicas, que se puedan relacionar con la apariencia, características contra la corrosión o el desgaste. De igual manera, no se tienen referencias del efecto de la deformación plástica en una etapa previa al proceso de anodizado y su influencia sobre la calidad del mismo. Por lo tanto, se quiere determinar cómo y en qué medida los factores del proceso (deformación plástica, material, concentración del electrolito, densidad de corriente, temperatura y tiempo) influyen en el proceso de anodizado y establecer la combinación de factores que producen los efectos más significativos sobre la rugosidad y la porosidad de la capa de óxido. La importancia de este estudio radica en considerar el uso de los aluminios Al3003 y Al6063, aumentando su rango de aplicación según los requisitos funcionales del producto final, al conocer, seleccionar y aplicar en la etapa final de manufactura, un proceso de anodizado con la combinación de parámetros (tipo de aluminio, densidad de corriente, concentración del electrolito, temperatura, tiempo) que producen respuestas seleccionadas o requeridas de rugosidad y porosidad de la capa de óxido, en la superficie del material, las cuales generalmente son asociadas con la apariencia, resistencia a desgaste y resistencia a la corrosión que inicialmente no posee el material base.

1.1 Importancia de la porosidad y rugosidad de la capa anodizada

El anodizado de aluminio, forma alúmina porosa (Kawasaki, 2008). La geometría de esta alúmina porosa puede ser representada esquemáticamente como una estructura de panal de abeja donde los poros crecen perpendicularmente a la superficie (Kawasaki, 2008; Belwalkara y col., 2008). La porosidad del anodizado permite colorear el óxido por medio de tintes orgánicos o impregnación de pigmentos para usarse en una amplia variedad de aplicaciones de acabados

nuevos e interesantes, los cuales son aceptados ampliamente entre el espectro de consumidores (Tsangaraki y col., 2006). Por otra parte, la porosidad tiene valor para la fijación de huesos cuando se genera en titanio y en tratamientos de gases contaminantes de vehículos, como catalizador y colector de partículas, asimismo, aumenta la capacidad para retener lubricantes, reduciendo la abrasión de la contraparte cuando se fabrica una superficie con bajo coeficiente de fricción que sea autolubrificante; permite al material recubrirse con PTEF y uniones adhesivas mejorando la resistencia al calor con recubrimientos poliméricos, además, tiene aplicación en dispositivos electrónicos, optoelectrónicos, magnéticos, y en nanotecnología (nanobarras, nanocables, nanotubos) (Wang y col., 2005). Igualmente, la rugosidad predice el funcionamiento mecánico de un componente debido a que las irregularidades en la superficie pueden ser inicio de grietas y corrosión (Shih, 2008), además, juega un rol importante para determinar como un objeto interactúa con el ambiente, ya que influye tanto en características estéticas como en fenómenos de desgaste: abrasivo, superficial y corrosivo (Shackelford, 1998). Generalmente, las superficies rugosas se desgastan más rápidamente y tienen coeficientes de fricción mayores que las superficies lisas.

2 Parte experimental

Se establecieron los siguientes parámetros y sus niveles como los más importantes del proceso considerando la experiencia de especialistas de la industria (Montgomery, 2007): el aluminio C:[Al3003,Al6063], la concentración del electrolito D:[1,2M; 2M], la densidad de corriente E:[1Amp/dm²; 3Amp/dm²], la temperatura F:[15°C, 25°C], el tiempo G:[30min; 60min], y como variable de ruido, la deformación plástica X:[0%,10%,20%,30%]. El esquema de la instalación utilizada se muestra en la fig. 1.

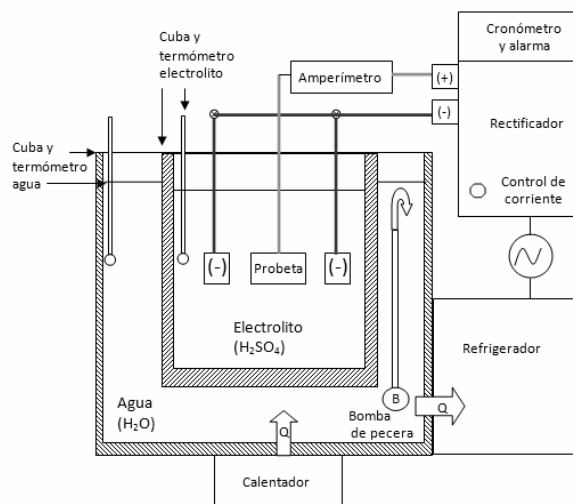


Fig. 1. Esquema funcional de la instalación de anodizado

Se seleccionó un diseño factorial fraccionado 2^{7-2} , más 4 puntos centrales a los factores cuantitativos en cada aluminio para poder observar la posible pérdida de linealidad en los efectos de los factores. Posteriormente, se hacen 8 replicas, para la validación de las respuestas, lo que permite una estimación del error. Se realizaron 48 experimentos de manera aleatoria. Por lo tanto, se utilizaron 48 probetas de (25mm)x(15mm)x(1.56mm), para que su calentamiento no influya en la temperatura del electrolito y para observarlas en el microscopio de barrido electrónico (MBE) [23]. De cada aluminio, se tomaron 4 grupos de seis (6) probetas con los porcentajes de reducción especificados. El área matemática de cada probeta es aproximadamente de $500 \text{ mm}^2 = 0,05 \text{ dm}^2$, debido a que una cara se cubrió con resina epóxica. Las probetas se limpian con alcohol absoluto por inmersión, se decapan por 30 s en hidróxido de sodio (NaOH) al 10% peso, se lavan con agua destilada, se aclaran con ácido nítrico 15% por 15s, se lavan con agua destilada, se coloca en la cuba electrolítica y se anodiza según los niveles de los factores indicados para la prueba, se lava con agua, se seca al aire y se almacena y codifica para su posterior análisis. En la Fig. 2, se muestra el medidor de rugosidad superficial MITUTOYO SJ-201P utilizado para determinar la rugosidad promedio Ra en la caracterización del acabado superficial, el cual es el parámetro más ampliamente adoptado en la industria para caracterizar la rugosidad (Kadirgama, 2009). La distancia sobre la cual se tomo cada medida fue de $0.8 \text{ mm} \times 5$ con un filtro PC50. Para la cuantificación de la porosidad se toman la cantidad de poros y la razón de porosidad para caracterizar la porosidad de la muestra (Wang y col., 2005; Belwalkara y col., 2008).



Fig. 2. Rugosímetro utilizado para la medición de la rugosidad Ra en las probetas examinadas

Para evaluar la morfología de la superficie, se usó el microscopio MBE. Las probetas fueron inicialmente bom-

bardeadas por deposición física de vapor (VPD) con oro creando una capa de menos de 1 Angstrom de espesor antes de la observación, con el objetivo de poder fotografiarlas y mejorar la observación de las imágenes. Una vez obtenidas las fotografías la medición de la porosidad y la cantidad de poros se realizó mediante el software ImageJ (NINDS). En la Fig. 3, se muestra la probeta sin anodizar, en la Fig. 4, se muestra la probeta anodizada tal como la genera el MBE. Con el programa ImageJ se hace binaria la imagen, Fig. 5. Los agujeros negros se consideran poros y la parte blanca matriz. Los agrupamientos que pertenecen al mismo poro son coloreados para diferenciar un poro de otro fig. 6.

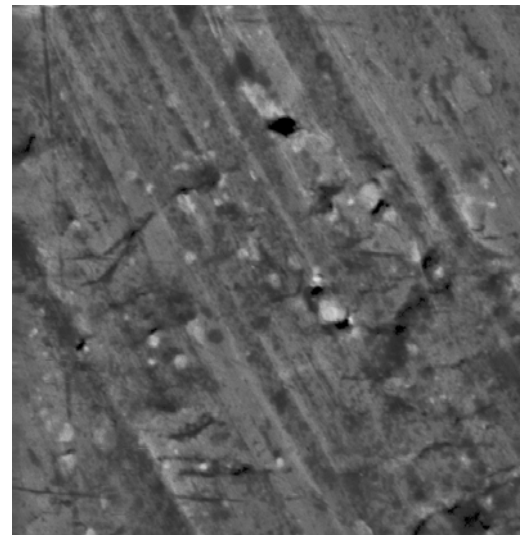


Fig. 3. Imagen de la probeta aluminio 3003 sin anodizar. 10000X

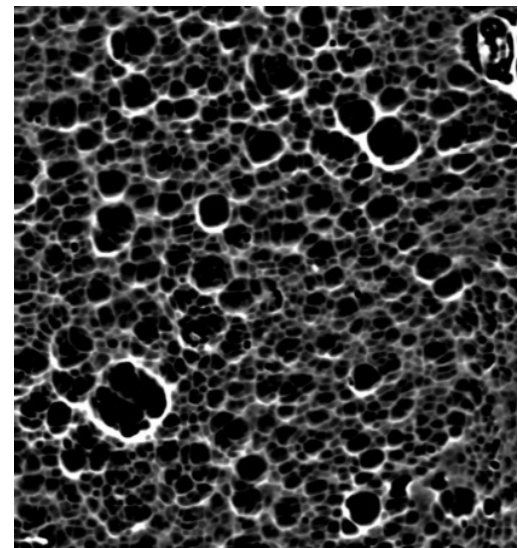


Fig. 4. Imagen obtenida con el MBE. Probeta de aluminio 3003, con 10% de deformación, concentración 1,2 M; densidad de corriente 1 Amp/dm²; temperatura 15°C y tiempo 30 min

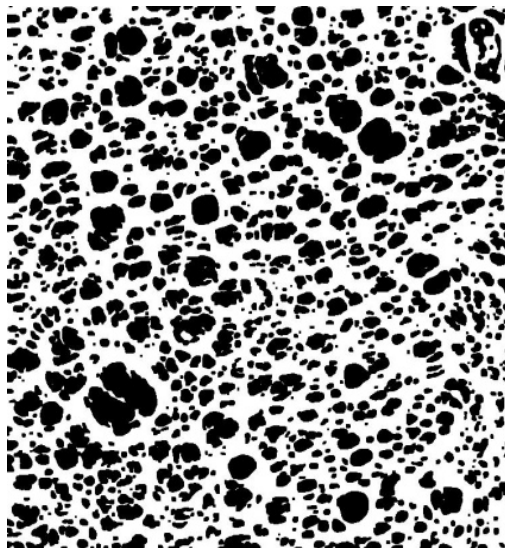


Fig. 5. Imagen binaria

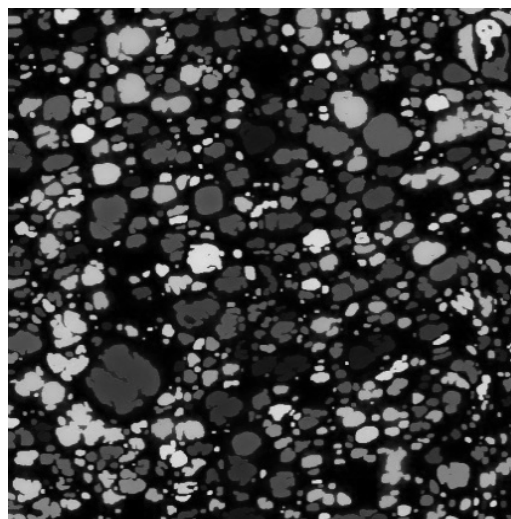


Fig. 6. Poros localizados

Las observaciones por MBE se realizaron en un equipo HITACHI S-2500 con electrones secundarios y el análisis químico utilizando un equipo THERMO-NORAN acoplado al MBE.

2.1 Procedimiento para determinar los efectos que produce cada factor y su significancia

Las ecuaciones para determinar el efecto (Ef) que produce cada factor sobre la respuesta, se muestran a continuación:

Para los factores cualitativos:

$$Ef_c = \sum_{i=1}^{n=48} \frac{E_i \cdot Factor C_i}{\frac{n}{2}} \quad (1)$$

Para los factores cuantitativos:

$$Ef_d = \sum_{i=1}^{n=48} \frac{E_i \cdot Factor D_i}{16} \quad (2)$$

La suma total de los cuadrados es:

$$SS_c = \sum_{i=1}^{n=48} E_i^2 - \frac{Y^2}{48} \quad (3)$$

La ecuación que define la suma de cuadrados para cada término cualitativo, utilizando como ejemplo el factor C será:

$$SS_c = \frac{(\sum_{i=1}^{n=48} E_i \cdot Factor C_i)^2}{48} \quad (4)$$

Y para los factores cuantitativos, utilizando como ejemplo el factor D será:

$$SS_D = \frac{(\sum_{i=1}^{n=48} E_i \cdot Factor D_i)^2}{32} \quad (5)$$

La suma de los cuadrados para el modelo es la suma de los cuadrados de todos los factores y la suma de los cuadrados para el error es la total menos el modelo:

$$SS_{modelo} = \sum SS_{factores} \quad (6)$$

$$SS_{Error} = SS_c - SS_{modelo} \quad (7)$$

La media de los cuadrados para cada elemento, por ejemplo para el modelo:

$$MS_{modelo} = \frac{SS_{modelo}}{V_{modelo}} = \frac{SS_{modelo}}{32} \quad (8)$$

Donde: V son los grados de libertad

Y la media de los cuadrados para el error será:

$$MS_{error} = \frac{SS_{error}}{V_{error}} = \frac{SS_{error}}{7} \quad (9)$$

El estadístico de prueba es F_0 , definido como:

$$F_{factor} = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} \quad (10)$$

El estadístico de prueba F_0 , se utiliza para hacer una prueba de significación o de hipótesis. En esta prueba, se puede determinar la probabilidad P mediante tablas estadís-

ticas de una distribución F, con los grados de libertad del error Verror y del factor Vfactor; P (F0, Vfactor, Verror) indica la probabilidad de que el factor produzca el efecto calculado en la respuesta cuando se tiene una hipótesis nula $H_0: \mu_1 = \mu_2$ verdadera, es decir, cuando los cambios de nivel en el factor en realidad no afectan la respuesta promedio (cuando el factor no es significativo). Este valor P, se compara con un nivel de significancia específico como por ejemplo un $\alpha=0.1$ o $\alpha=0.05$. Si $P < \alpha$ se considera el factor significativo (en realidad un cambio de nivel en el factor afecta la respuesta promedio) y se rechaza la hipótesis H_0 .

3 Efectos sobre la rugosidad

En la tabla 1 se muestran los factores más significativos en la rugosidad: (a) la densidad de corriente, (b) la temperatura y (c) el tipo de aluminio, los cuales generan los menores resultados de rugosidad en los valores de 1A/dm², 25°C y aluminio Al3003 respectivamente.

Tabla 1. Información de los términos significativos en rugosidad según ANOVA

Término	Efecto	F ₀	Valor P
C:Aluminio	0,5665	9,92	0,0162
E:Densidad	0,5156	6,57	0,0373
F:Temperatura	-0,5360	7,13	0,032
DF	0,5144	6,54	0,0377

En cualquier caso, un nivel alto de la temperatura de la solución del electrolito genera la menor rugosidad debido a la alta disolución. El efecto de la interacción densidad de corriente y temperatura se puede apreciar mejor en la gráfica cubico de la Fig. 7, donde el aumento de temperatura a baja densidad de corriente produce disminución de la rugosidad lo cual no es tan significativa con una densidad de corriente de 3A/dm².

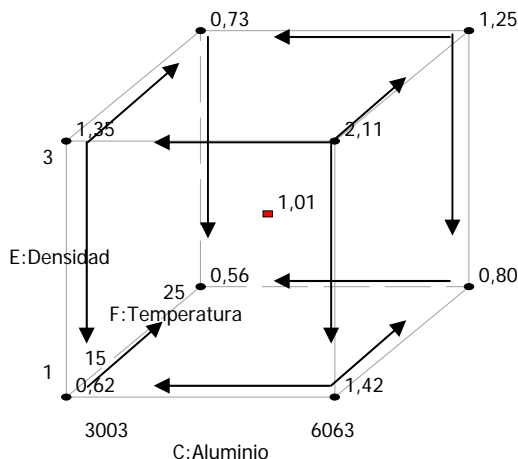


Fig.7. Gráfico cúbico aluminio, densidad de corriente y temperatura

El incremento de la energía de los iones que forman la capa de alúmina es la causa del aumento de rugosidad cuando aumenta la densidad de corriente. Por otro lado, en la Fig. 8 se muestra la curva de contorno concentración-temperatura realizado mediante el software DOE (DOE++), en esta se observa que a baja concentración, existe disminución de la rugosidad con el aumento de temperatura, sin embargo, con el aumento de concentración va disminuyendo esta variabilidad, siendo casi inapreciable cuando la concentración es de 2M. Este comportamiento se debe a que a baja concentración de la solución son menos las moléculas de ácido sulfúrico y es menor su rapidez para atacar la superficie del metal. Sin embargo, el aumento de temperatura activa más la reacción heterogénea de oxidoreducción al aumentar la solubilidad de la concentración, disminuyendo proporcionalmente la rugosidad. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de la disolución, las moléculas de ácido se agrupan más reduciendo su dependencia al efecto de la temperatura.

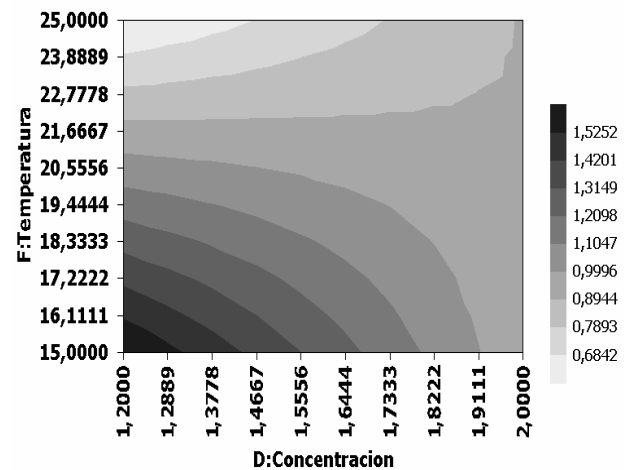


Fig. 8. Curvas de contorno concentración vs. temperatura

A continuación, se seleccionan los valores de los coeficientes de regresión que resultaron ser significativos de los calculados en la tabla 1, para el estudio de la rugosidad. Estos se utilizan para definir una ecuación que permita modelar la respuesta de rugosidad en función de los términos significativos individuales o de interacción. La ecuación que modela la respuesta de rugosidad es:

$$Y (Ra) = 1,07375 + 0,2752x_c - 0,0959x_d + 0,2578x_e - 0,2684x_f + 0,0409x_g + 0,2572 x_d x_f + 0,1828 x_c x_d x_g \quad (11)$$

Donde x_c, x_d, x_e, x_f, x_g son variables codificadas ($-1 \leq x_i \leq +1$), y representan niveles de los términos C, D, E, F y G.

Los resultados de rugosidad Ra varían entre (0,45-2,13 μm) en el aluminio A13003 y para el aluminio Al6063 varían entre (0,52-3,28 μm).

4 Efectos sobre la porosidad

En la tabla 2, se muestran los factores más significativos en la porosidad según el tipo de aluminio: (a) el porcentaje de la deformación inicial el cual disminuye la porosidad del Al6063, (b) la temperatura de 25°C produce una porosidad mayor que en 15°C. Se observaron mayores porosidades en el aluminio Al3003 debido a la reducción de porosidad en el Al6063 por la deformación inicial. En la fig.9, se muestra la interacción concentración de la solución contra la temperatura. Se puede observar que la porosidad aumenta con el aumento de temperatura, debido al aumento de la solubilidad de la concentración y la energía cinética de las moléculas. Esto sucede, independientemente de la concentración de la solución para valores de concentración entre 1,2M y 2 M.

Tabla 2. Información de los términos significativos en porosidad según ANOVA

Término	Efecto	F ₀	Valor P
C:Aluminio	-131,03	25,66224	0,0002
F:Temperatura	147,95	21,81247	0,0004
X:Deformación	-87,52	3,16983	0,057
DF	-84,38	7,095294	0,0185
CG	-84,35	7,090249	0,0186

También se observa que con baja concentración existe un amplio rango de valores de porosidad según sea la temperatura de la solución, pero la variabilidad de la porosidad debida al aumento de temperatura se hace más pequeña si la concentración es mayor. Esto se debe a que cuando la concentración del electrolito es menor, también es menor la probabilidad de que se den colisiones entre las moléculas, disminuyendo la rapidez de la reacción para la formación de los poros. A medida que la concentración del electrolito se hace mayor, aumenta la probabilidad de colisión y con ella la rapidez de la reacción y formación de poros. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de la disolución, las moléculas de ácido se agrupan más reduciendo su dependencia al efecto de la temperatura.

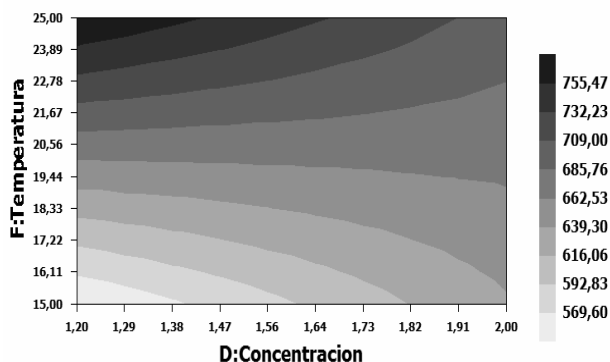


Fig. 9. Curva de contorno de las variables concentración vs. temperatura

A continuación, se seleccionan los valores de los coeficientes de regresión que resultaron ser significativos de los calculados en la tabla 2, para el estudio de la porosidad. Estos se utilizan para definir una ecuación que permita modelar la respuesta de porosidad en función de los términos significativos individuales o de interacción. La ecuación resultante que modela la respuesta de porosidad es:

$$Y(\text{porosidad}) = 712,90 + 9,626x_a - 32,7319x_b - 20,6527x_ax_b - 65,5156x_c + 2,9269x_d + 9,5994x_e + 73,9769x_f + 22,1287x_g + 7,1344x_ax_c - 31,7569x_bx_c - 36,155x_ax_e + 6,595x_bx_e - 42,1769x_cx_g - 42,1919x_dx_f + 71,1638x_cx_e x_f x_g \quad (12)$$

donde $x_a, x_b, x_c, \dots, x_{efg}$ son variables codificadas ($-1 \leq x_i \leq +1$), que representan a los términos A, B, C, C.E.F.G.

La deformación equivalente se determina por medio de un procedimiento algebraico el cual utiliza 2 factores de 2 niveles -1 y +1 que se relacionan con los 4 niveles de deformación inicial que tiene la probeta antes del proceso de anodizado. El procedimiento es mostrado en la tabla 3 y debe ser utilizado para determinar la porosidad.

Tabla 3. El factor deformación X con cuatro niveles expresado como 2 factores de 2 niveles

Factor A	Factor B	AB	Factor X
-1	-1	+1	0
+1	-1	-1	10
-1	+1	-1	20
+1	+1	+1	30

Los resultados encontrados de porosidad varían entre (535.86 – 969.52 poros) en el aluminio Al3003 y para el aluminio Al6063 varían entre (410.72 - 982.26 poros).

5 Conclusiones

Se utilizó la metodología del diseño factorial, recurriendo al enfoque de diseño robusto, la cual es una herramienta que demostró ser de gran utilidad para la realización de esta investigación. Mediante esta metodología se determinaron los factores significativos que afectan las respuestas de rugosidad y porosidad de la capa de óxido anódica.

Al contrastar las hipótesis planteadas se tiene que: el porcentaje de deformación inicial generó respuestas robustas en la porosidad de Al3003, así como en la rugosidad de ambos aluminios.

En el estudio de la rugosidad superficial del anodizado, se encontraron como los factores más significativos: (a) la densidad de corriente, (b) la temperatura y (c) el tipo de aluminio, los cuales generan los menores resultados de rugosidad en los valores de 1A/dm², 25°C y aluminio Al3003 respectivamente. La baja la rugosidad permite crear super-

ficies con menor coeficiente de fricción; que producen menor desgaste. Además se reduce la probabilidad de inicio de grietas y de la corrosión; y hay poca disminución de la resistencia a la fatiga del metal.

Por otro lado, en el estudio de la porosidad del anodizado, se encontraron como factores más significativos: (a) que el aumento del porcentaje de la deformación inicial disminuye la porosidad del Al6063, (b) la porosidad que se produce con la temperatura de 25°C es mayor que en 15°C. El efecto de mayores porosidades en el aluminio A13003 se debe a la reducción de porosidad en el Al6063 por la deformación inicial. El aumento de la porosidad en el metal aumenta la capacidad de: absorción de tintes orgánicos o la deposición de pigmentos; así como para retener lubricantes y de anclar por uniones adhesivas o recubrimientos poliméricos.

Finalmente, se realizaron modelos de predicción de cada una de las respuestas en función de los parámetros significativos, estas ecuaciones permitirán predecir la rugosidad, y la porosidad de la capa de óxido de acuerdo a los requerimientos del producto, por medio de la selección apropiada de los parámetros del proceso.

Agradecimientos

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico, Tecnológico y de las Artes de la Universidad de los Andes. CDCHT-ULA. Proyectos N°: I-1194-09-02-EM y N°: I-933-06-02-A.

Referencias

Bai A; HU C C; Yang Y; Lin C, 2008, Pore diameter control of anodic aluminum oxide with ordered array of nanopores, *Electrochimica Acta*, Vol 53, pp. 2258-2264.
 Belwalkara A; Grasinga E; Geertruydenb W; Huangc Z; Misioleka W, 2008, Effect of processing parameters on pore structure and thickness of anodic aluminum oxide (AAO) tubular membranes, *Journal of Membrane Science*, Vol. 319, pp.192–198.
 DOE++. Análisis y delineamiento de experimentos. 1994. Se encuentra en: <http://www.reliasoft.es/software/doe.htm>. Fecha de consulta: el 21 de mayo de 2009

Feliu S Jr; Bartolome M; Gonzales J; Lopez V; Feliu S, 2008, Passivating oxide film and growing characteristics of anodic coating on aluminium alloys, *Applied Surface Science*, Vol. 254, pp. 2755-2762.

Kadirgama K; Noor M, 2009, Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 25, pp. 250-256.

Kawasaki T, 2008, Manufacturing of anodic porous alumina for barriers in a dielectric barrier discharge reactor, *Journal of Electrostatics*, pp. 395-400.

Konieczny J; Dobrzanski L; Labisz K; Duszczyc J, 2004, The influence of cast method and anodizing parameters on structure and layer thickness of aluminum alloys, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 157, pp. 718-723.

Montgomery D, 2007, *Diseño y análisis de experimentos*, Limusa Wiley, México.

NINDS R. S., (s.f.), *ImageJ - Image processing and analysis in Java*. Se encuentra en: <http://rsb.info.nih.gov/ij/>. Fecha de consulta: el 23 de mayo de 2009

Shackelford J, 1998, *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*, Prentice Hall, México.

Shih T-S; Wei P S; Hung Y S, 2008, Optical properties of anodic aluminum oxide film on AL1050 alloys, *Surface & Coating Technology*, Vol. 202, pp. 3298-3305.

Spaelstra M; Van Westing E; De Wit J, 2001, Characterization of unsealed anodic layers on aluminum, *Materials and corrosion*, Vol. 52, pp. 661-666.

Tsangaraki-Kaplanoglou; Theohari S; Dimogerontakis T, 2006, An investigation of electrolytic coloring process of anodized aluminum coating, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 2749- 2759.

Wang H; Wang H, 2005, Thick and macroporous anodic alumina membranes for self-lubricating surface composites, *Applied Surface Science*, Vol. 249, pp. 151-156.

Yu C. U; Hu C. C; Bai A; Yang Y. F, 2007, Pore-size dependence of AAO films on surface roughness of Al1050 sheets controlled by electropolishing coupled with fractional factorial design, *Surface & Coating Technology*, Vol. 201, pp. 7259-7265.

Recibido: 20 de abril de 2010
Revisado: 15 de diciembre de 2010

