

Characterization of anodizing process on aluminum Al3003 and Al6063 using the multifactorial analysis and robust design techniques

Leonardo Eladio Vergara Guillén¹, Luis Manuel Nerey Carvajal¹,
Víctor Manuel Guédez Torcates²

¹Escuela de Diseño Industrial, ²Escuela de Ingeniería Mecánica,
Universidad de Los Andes. Código postal: 5101. Teléfono: +582742401902, +582742402936.
lvergara@ula.ve, nerey@cptm.ula.ve, guedez@ula.ve

Abstract

This study pretends to quantify the effect of the process parameters in the anodizing of aluminum Al3003 and Al6063. For it, were made studies of the micro-hardness, roughness, thickness of layer and porosity of the anodized surface, using multifactorial analysis and robust design techniques. The following parameters levels were established: temperature [15°C, 25°C], time [30min; 60min], electrolyte concentration [1.2M; 2M], current density [1Amp/dm²; 3Amp/dm²], aluminum [Al3003, Al6063], and the plastic deformation [0%,10%,20%,30%], as noise parameter. A combined fractional design 2⁷⁻² was proposed, a total of 48 tests were made using sulfuric acid electrolytic solutions. The measurement of micro-hardness was made with an indentador Vickers loaded with 400g; the measurement of roughness Ra was made with a surface roughness tester MITUTOYO SJ-201P; and electronic microscopy was used to observe the porosity and the thickness of the oxide layer. A variance analysis (ANOVA) was made to establish the significant factors and the robustness of the effects in the results. Micro-hardness [HV]: [85.74-308.87]; roughness [μm]: [0.45-3.28]; porosity [pores]: [410.72-969.52] and thickness of oxide [μm]: [12.82-94.69] results were found. Finally, the best results and their parameters are shown for each response.

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

Caracterización del proceso de anodizado en aluminio Al3003 y Al6063 utilizando técnicas del análisis multifactorial y diseño robusto

Resumen

Este estudio pretende cuantificar el efecto de los parámetros del proceso en el anodizado del aluminio Al3003 y Al6063. Para ello, se realizaron estudios de la microdureza, rugosidad, espesor de capa y porosidad de la superficie anodizada, utilizando técnicas de análisis multifactorial y diseño robusto. Se establecieron los siguientes niveles de los parámetros: 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 como variable de ruido, la deformación plástica [0%, 10%, 20%, 30%]. Se propuso un diseño fraccionado 2⁷⁻² mixto, con el cual se realizaron un total de 48 pruebas usando soluciones electrolíticas de ácido sulfúrico. La medición de microdureza se realizó con un indentador Vickers con carga de 400g; la medición de rugosidad R_a se realizó con un rugosímetro MITUTOYO SJ-201P; la porosidad y el espesor de

la capa de óxido se captó mediante microscopia 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 microdureza [HV]: [85,74-308,87]; rugosidad [μm]: [0,45-3,28]; porosidad [poros]: [410,72-969,52] y espesor de óxido [μm]: [12,82-94,69]. Finalmente, se muestran las combinaciones de parámetros que producen las mejores respuestas.

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

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 [1-4]. Este proceso, fue desarrollado para tratar el aluminio, el cual es un material extraordinariamente versátil, ya que 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 microdureza, la rugosidad, la porosidad, y el espesor de la capa de óxido. La importancia de este estudio radica en considerar y utilizar el aluminio 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 microdureza, rugosidad, porosidad y espesor de la capa de óxido, en la superficie del material, que generalmente son asociadas con características deseadas en el producto final (resistencia a corrosión, resistencia a desgaste, apariencia etc.), que no tiene inicialmente el material base.

Importancia de las respuestas a estudiar

El aluminio y sus aleaciones quedan protegidos naturalmente por una capa de óxido, cuando son expuestas al aire. Sin embargo, esta capa de óxido natural es delgada y heterogénea y no ofrece protección suficiente contra ambientes agresivos [5]. Es por ello que mediante el proceso electroquímico de anodizado se puede convertir un espesor de óxido mayor, el cual mejora algunas características del material como son la resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, la facilidad de limpieza superficial, asimismo, se pueden crear capas dieléctricas, aislantes térmicas y eléctricas para la industria electrónica [6-9]. Por otro lado, el anodizado de aluminio, forma alúmina porosa [10]. La geometría de esta alúmina porosa puede ser representada esquemáticamente como una estructura de panal de miel donde los poros crecen perpendicularmente a la superficie [10, 11]. La porosidad permite colorear el óxido por medio de tintes orgánicos u 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 [12]. 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 partícu-

las [11], además, 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 [13], asimismo tiene aplicación en dispositivos electrónicos, magnéticos, y en nanotecnología [2, 12, 13]. Del mismo modo, la dureza de la capa de óxido es una propiedad muy importante porque indica de forma cualitativa su resistencia mecánica, es una medida de la resistencia a la deformación permanente, de su resistencia al rayado y además, es un índice de la resistencia al desgaste abrasivo [14-17]. Se ha observado que existe una correlación positiva entre la dureza y la resistencia al desgaste, abrasión y vida útil de un material [18-20]. Finalmente, la rugosidad predice el funcionamiento mecánico de un componente debido a que las irregularidades en la superficie pueden ser inicio de grietas y corrosión [7, 9], 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 [14]. Generalmente, las superficies rugosas se desgastan más rápidamente y tienen coeficientes de fricción más grandes que las superficies lisas.

Parte experimental

Se establecieron los siguientes parámetros y sus niveles como los más importantes del proceso [1-5, 7, 11, 12], considerando la experiencia y recomendaciones de especialistas de la industria [21, 22]: el aluminio C:[Al3003,Al6063], la concentración de 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%]. Se seleccionó un diseño factorial fraccionado 2⁷⁻², de resolución IV, con generadores de fracción F=ABCD y G=ABDE, 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. Por lo tanto, se

realizaron los 48 experimentos de manera aleatoria, utilizando 48 probetas con dimensiones iniciales de (25mm)×(15mm)×(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 mm²=0,05 dm², 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 15 s, 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 lavan con agua, se secan al aire y se almacenan y codifican para su posterior análisis. Para la medición de la microdureza se utiliza el ensayo de microdureza Vickers, y se toma el promedio de 5 mediciones. Los valores medidos antes del anodizado fueron 48 HV y 102,64 HV para el Al3003 y Al6063 respectivamente. Se utiliza el medidor de rugosidad superficial MITUTOYO SJ-201P, 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 [24]. La distancia sobre la cual se toma cada medida fue de 0.8mm×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 [11, 13]. Para evaluar la morfología de la superficie, se usa el MBE. Las probetas fueron inicialmente bombardeadas 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 [25]. En la Figura 1.a, se muestra la imagen tal como la genera el MBE. Con el software se hace binaria la imagen, Figura 1.b., donde los agujeros negros se consideran poros, y los agrupamientos que pertenecen al mismo poro son coloreados para diferenciar un poro de otro Figura 1.c.

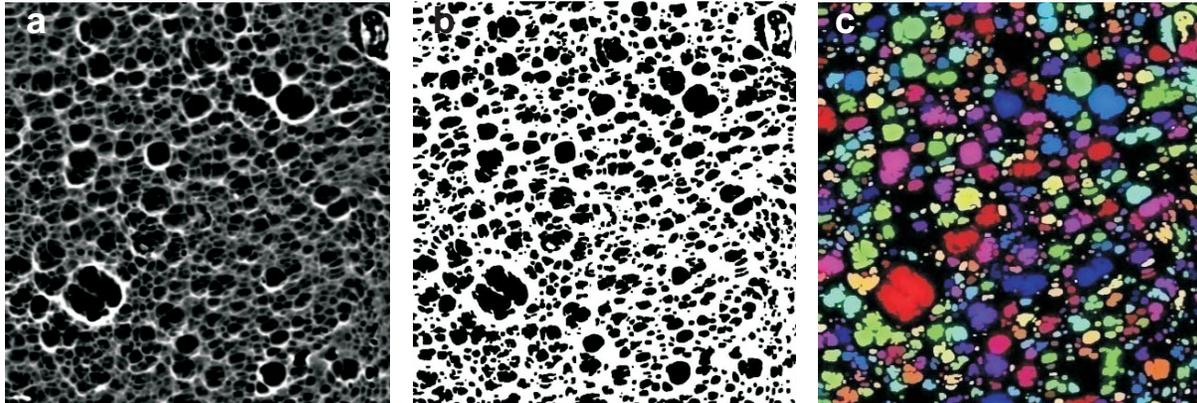


Figura 1. a) Imagen obtenida con el MBE. b) Imagen binaria. c) Poros localizados.

Para la medición del espesor se hace un examen microscópico basado en la norma ASTM [26], la cual consiste en cortar una porción de la probeta de prueba y prepararla mediante pulido para luego medirla con un microscopio. Para ello se usó un microscopio de barrido electrónico (MBE) y análisis químico. La medida tomada de espesor en cada probeta es el promedio de cinco mediciones realizadas. El procedimiento se observa en la Figura 2.

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

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

Para los factores cualitativos:

$$E_f c = \frac{\sum_{i=1}^{n=40} E_i \text{Factor } C_i}{n/2} = \frac{E_1(1) + E_2(-1) + E_3(1) \dots + E_{39}(-1) + E_{40}(1)}{20} \quad (1)$$

Para los factores cuantitativos:

$$E_f d = \frac{\sum_{i=1}^{n=40} E_i \text{Factor } D_i}{16} = \frac{E_1(1) + E_2(-1) + E_3(1) \dots + E_{39}(0) + E_{40}(0)}{16} \quad (2)$$

La suma total de los cuadrados es:

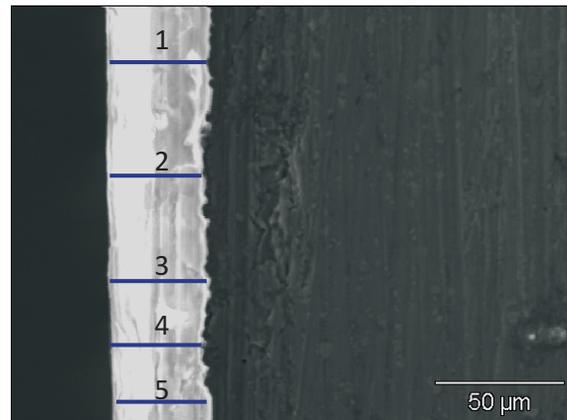


Figura 2. Determinación del espesor. Magnificación: 1500X.

$$SS_t = \sum_{i=1}^{n=40} E_i^2 - \frac{y^2}{40} \quad (3)$$

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

$$SS_C = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n=40} E_i \text{Factor } C_i \right)^2}{40} \quad (4)$$

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

$$SS_D = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n=40} E_i \text{Factor } D_i \right)^2}{32} \quad (5)$$

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:

$$SS_{modelo} = \sum SS_{factores} \tag{6}$$

$$SS_{error} = SS_t - SS_{modelo} \tag{7}$$

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

$$MS_{modelo} = \frac{SS_{modelo}}{V_{modelo}} = \frac{SS_{modelo}}{32} \tag{8}$$

donde: V son los grados de libertad

Y la media de los cuadrados para el error será:

$$MS_{error} = \frac{SS_{error}}{V_{error}} = \frac{SS_{error}}{7} \tag{9}$$

El estadístico de prueba es F_0 , definido como:

$$F_{factor} = \frac{MS_{factor}}{MS_{error}} \tag{10}$$

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 estadísticas de una distribución F, con los grados de libertad del error V_{error} y del factor V_{factor} , $P(F_0, V_{factor}, V_{error})$ 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, cuan-

do 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 .

Resultados y discusión

Efectos sobre la microdureza

En el estudio de la microdureza del anodizado, los mayores valores se encontraron en Al6063 el cual es de naturaleza más dura que el Al3003 casi 2 veces más duro antes del anodizado. Los factores más significativos de acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) Tabla 1, fueron los siguientes: (a) la densidad de corriente cuyo nivel más alto 3A/dm², aumenta la microdureza debido a que la intensidad de corriente trasmite la energía necesaria para el movimiento de los iones que forman la capa de alúmina la cual se endurece a medida que crece; (b) la temperatura cuyo valor menor 15°C, aumenta la microdureza porque es menor el efecto de disolución producido por el ácido sulfúrico sobre la superficie de la pieza y la formación de alúmina por la electrólisis no se ve reducida, lo que si ocurre en los niveles superiores de temperatura; (c) un tiempo de 60 minutos aumenta la microdureza debido a que la alúmina sigue creciendo en el rango estudiado; (d) se produjo un aumento de la microdureza en el aluminio Al6063, el cual fue proporcional al porcentaje de deformación. Este efecto no fue significativo en el aluminio Al3003.

Tabla 1
Información de los términos significativos en microdureza según ANOVA

Término	Efecto	F0	Valor P
X:deformación	62,16	4,07	0,05
C:Aluminio	78,79	43,10	0,0003
E:Densidad	89,25	44,24	0,0003
F:temperatura	-78,90	34,57	0,0006
G:tiempo	76,85	32,80	0,0007
XC	35,58	2,62	0,14

Efectos sobre la rugosidad

En la Tabla 2 se muestran los factores más significativos en la rugosidad: (a) el tipo de aluminio (b) la temperatura y (c) la densidad de corriente, los cuales generan los menores resultados de rugosidad en los valores del aluminio Al3003, 25°C y 1A/dm² respectivamente.

En todo caso, un nivel alto de la temperatura de la solución genera baja rugosidad debido a la alta disolución. El efecto de la interacción densidad de corriente y temperatura se puede apreciar mejor en la Figura 3, donde el aumento de temperatura a baja densidad de corriente produce disminución de la rugosidad y es más significativo con E= 3A/dm².

Efectos sobre la porosidad

Los factores más significativos en la porosidad son: (a) el porcentaje de la deformación inicial el cual disminuye la porosidad del Al6063, (b) la temperatura de 30°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. 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, independientemente de la concentración de la solución para valores de concentración entre 1,2 M y 2 M. También se observó 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 redujo con concentraciones mayores. 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

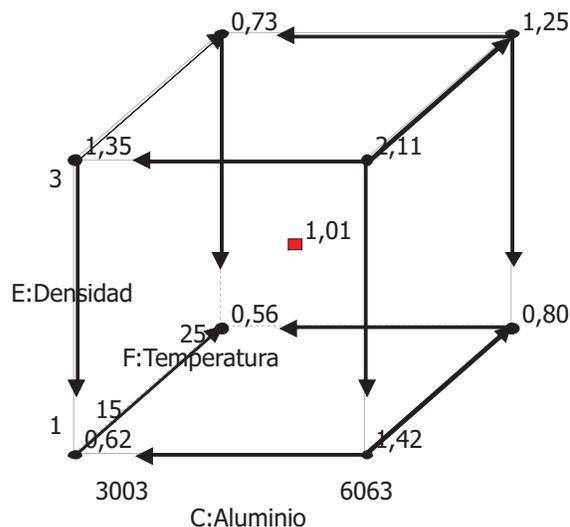


Figura 3. Gráfico cúbico de las variables: aluminio, densidad y temperatura.

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 [27].

Efecto sobre el espesor de la capa de óxido

En la Tabla 3 se muestran los factores más significativos en el espesor de la capa de óxido los cuales son: (a) la concentración de la solución 2M aumenta al espesor cuando se mantienen constantes los demás parámetros del proceso, (b) la densidad de corriente en 3A/dm² produce espesores altos, (c) la temperatura en 15°C aumenta el espesor, (d) cuando se trabaja con un tiempo en el nivel de 60 minutos los valores del espesor

Tabla 2
Información de los términos significativos en rugosidad según ANOVA

Término	Efecto	F0	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

Tabla 3
Información de los términos significativos en espesor según ANOVA

Término	Efecto	F0	Valor P
C:Aluminio	7,67	52,31	0,0002
D:Concentracion	14,31	189,16	2,53E-06
E:Densidad	27,22	4,74	0,066
F:temperatura	-4,31	90,47	2,97E-05
G:tiempo	18,82	18,81	0,0034
CE	4,24	4,60	0,0691
CF	6,49	10,77	0,0134
DE	13,15	44,19	0,0003
DF	-10,49	28,09	0,0011
DG	5,76	8,48	0,0226
CDE	-4,40	4,95	0,0615
CDG	-10,79	29,744	0,001

son más altos y (e) el espesor promedio es ligeramente mayor cuando se trabaja con Al6063, porque tiene mayores porcentajes de Mg y Ti que son más afines al oxígeno que también se anodizan.

En último lugar, las combinaciones específicas de parámetros del proceso que producen los mayores valores en cada una de las respuestas se resumen en la Tabla 4.

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 determinación de los factores que influyen en el proceso de anodizado y para la sintetizar la combinación de factores significativos que afectan las respuestas de microdureza, rugosidad, porosidad y espesor de la capa de óxido, junto con sus combinaciones más resaltantes. Estos resultados permitirán considerar los aluminios Al3003 y Al6063, aumentando su rango de aplicación según los requisitos funcionales del producto, al aplicar en la etapa final de manufactura, un proceso de anodizado con la combinación de parámetros que producen respuestas requeridas. Finalmente, al contrastar las hipótesis planteadas se tiene que el porcenta-

je de deformación inicial, generó respuestas robustas en la microdureza y la porosidad del Al3003, así como en la rugosidad, y espesor de la capa de óxido en ambos aluminios.

Agradecimiento

Al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico de la Universidad de los Andes. C.D.C.H.T-U.L.A. Proyectos N°: I-1194-09-02-EM.

Referencias bibliográficas

1. Feliu, S. Jr., Bartolome, M., Gonzales, J., Lopez, V., & Feliu, S. "Passivating oxide film and growing characteristics of anodic coating on aluminium alloys". *Applied Surface Science*, 254 (2008). 2755-2762.
2. Bai, A., HU, C. C., Yang, Y. F., & Lin, C. C. "Pore diameter control of anodic aluminum oxide with ordered array of nanopores". *Electrochimica Acta*, 53 (2008). 2258-2264.
3. Yakovleva, N. M., Anicai, L., Yakovlev, A. N., Dima, L., Khanina, E. Ya., Buda, M., "Structural study of anodic films formed on aluminium in nitric acid electrolyte". *Thin Solid films*, 416 (2002). 16-23.

Tabla 4
Resumen de las mejores respuestas a los tratamientos

X [%]	C [Al]	D [M]	E [A/dm ²]	F [°C]	G [min]	Microdureza [HV]	Rugosidad [µm]	Porosidad [poros]	Espesor [µm]
0	Al3003	2	3	15	60	296,64	0,74	890,23	94,69
10	Al3003	1,2	3	15	60	296,64	2,13	715,58	22,04
20	Al3003	1,2	3	15	60	296,64	1,73	713,22	23,24
30	Al3003	2	3	15	60	308,87	0,80	693,12	84,84
30	Al6063	1,2	3	15	30	285,12	2,37	554,00	26,70
30	Al6063	1,2	1	15	60	308,87	1,71	410,72	34,07
20	Al6063	2	1	15	60	296,64	2,00	550,00	30,31
20	Al6063	1,2	3	25	60	296,64	0,57	809,47	58,28
20	Al6063	1,2	1	25	30	115,88	0,65	623,10	14,66
0	Al3003	1,2	1	25	60	95,76	0,45	969,52	28,44
30	Al3003	1,2	1	25	60	89,55	0,72	950,27	14,52
10	Al3003	2	3	25	30	102,64	0,54	820,13	33,81
30	Al3003	1,2	3	25	30	105,10	0,83	815,68	25,15
10	Al6063	1,2	1	25	30	105,10	0,52	982,26	12,98
10	Al6063	1,2	3	25	60	285,12	0,88	858,42	62,75
10	Al6063	2	1	15	60	192,92	0,76	815,10	34,71
20	Al3003	1,6	2	20	45	107,65	0,94	800,39	46,98
30	Al3003	1,6	2	20	45	213,04	1,04	795,30	43,47
30	Al6063	2	3	25	60	245,16	2,26	512,15	76,73
10	Al6063	2	3	15	30	245,16	1,60	700,55	66,83
0	Al6063	2	3	25	60	199,13	1,31	807,22	61,27

X: % deformación; C: tipo de aluminio; D: concentración [M]; E: densidad de corriente [A/dm²]; F: temperatura [°C]; G: tiempo [min]

4. Konieczny, J., Dobrzanski, L. A., Labisz, K., Duszczak, J., "The influence of cast method and anodizing parameters on structure and layer thickness of aluminium alloys". *Journal of Materials Processing Technology* 157 (2004) 718-723.
5. Bensalah, W., Elleuch, K., Feki, M., Wery, M., & Gigandet, M. "Optimization of mechanical and chemical properties of sulphuric anodized aluminium using statistical experimental methods". *Material Chemistry and Physics*, 108 (2008) 296-305.
6. Morks, M., Hamdy, A. S., Fahim, N., & Shoeib, M. "Growth and characterization of anodic films on aluminum alloys in 5-sulfosalicylic acid solution". *Surface & Coatings Technology*, 200 (2006). 5071-5076.
7. Spoelstra M., Van Westing E, De Wit J. "Characterisation of unsealed anodic layers on aluminium". *Materials and corrosion*, 52 (2001). 661-666.
8. Vrublevsky, I., Jagminas, A., Schreckenbach, J., & Gadel, W. A. "Electronic properties of electrolyte/anodic alumina junction during porous anodizing". *Applied surface science*, 253 (2007). 4680-4687.
9. Shih, T. -S., Wei, P. S., & Hung, Y. S. "Optical properties of anodic aluminium oxide film on AL1050 alloys". *Surface & Coating Technology*, 202(2008). 3298-3305.
10. Kawasaki, T. "Manufacturing of anodic porous alumina for barriers in a dielectric barrier discharge reactor". *Journal of Electrostatics*, (2008) 395-400.
11. Belwalkara, A., Grasinga, E., Geertruydenb, W. V., Huangc, Z., & Misioleka, W. "Effect of processing parameters on pore structure and thickness of anodic aluminum oxide (AAO) tubular membranes". *Journal of Membrane Science*, 319 (2008). 192-198.
12. Tsangaraki-Kaplanoglou, Theohari, S., & Dimogerontakis, T. "An investigation of electrolytic coloring process of anodized aluminum coating". *Surface & Coatings Technology*, 201(2006). 2749- 2759.
13. H. Wang, & Wang, H. "Thick and macroporous anodic alumina membranes for self-lubricating surface composites". *Applied Surface Science*, 249 (2005). 151-156.
14. James Shackelford. "Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros". Prentice Hall. México, 1998.
15. Kalpakjian, S., & Schmid. "Manufactura, ingeniería y tecnología". Pearson Educación. Mexico, 2002.
16. Groover, M. "Fundamentos de manufactura moderna, Materiales, Procesos y sistemas". Prentice Hall: Pearson, 1997.
17. Smith, W., & Hashemi, J. "Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales". McGraw Hill, Mexico, 2004.
18. Mott, R. "Diseño de elementos de máquinas". Pearson Education, Mexico, 2006.
19. Liscano, S., Gil, L., & Subero, R. "Evaluación de la resistencia al desgaste abrasivo y deslizante de recubrimientos de alúmina-13%titania termorrociados sellados". UCT, (2006). 178-180.
20. Holmberg, K., Ronkainen, H., Laukkanen, A., & Wallin, K. "Friction and wear of coated surfaces- scales, modeling and simulation of tribomechanisms". *Surface & Coating Technology*, 202 (2007). 1034-1049.
21. Gutierrez, H., & Vara, R. d. "Análisis y diseño de experimentos". McGrawHill. Mexico, 2003.
22. Montgomery, D. "Diseño y análisis de experimentos". Limusa Wiley. Mexico, 2007.
23. Yu, C.-U., Hu, C.C., Bai, A., & Yang, Y.-F. "Pore-size dependence of AAO films on surface roughness of Al1050 sheets controlled by electropolishing coupled with fractional factorial design". *Surface & Coating Technology* 201 (2007). 7259-7265.
24. Kadirgama, K., & Noor, M. M. "Surface Roughness Prediction Model of 6061-T6 Aluminium Alloy Machining Using Statistical Method". *European Journal of Scientific Research*, 25 (2009). 250-256.
25. NINDS, R. S. (s. f.). ImageJ - Image processing and analysis in Java. Recuperado el 23 de Mayo de 2009, de <http://rsb.info.nih.gov/ij/>.
26. ASTM B487-85 (2007). Standard Test Method for Measurement of Metal and Oxide

Coating Thickness by Microscopical Examination of a Cross Section. Recuperado el 12 de Noviembre de 2009, de <http://www.astm.org/Standards/B487.htm>

27. Castellan, G. "Fisicoquímica". Addison Wesley. México, 1998.

Recibido el 10 de Mayo de 2011

En forma revisada el 10 de Septiembre de 2012