

## EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO AA 6063 Y AA 8011 ANODIZADAS, UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE SELLADO

Jeanette Hernández, Carlos Leal

Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”

Vicerrectorado Barquisimeto. Departamento de Ingeniería Metalúrgica

[jeanette\\_hernandez2000@yahoo.com](mailto:jeanette_hernandez2000@yahoo.com), [jphernandez@unexpo.edu.ve](mailto:jphernandez@unexpo.edu.ve)

**RESUMEN:** El proceso aplicado industrialmente para lograr la formación de una gruesa capa protectora del Aluminio, se conoce como anodizado, el que consiste en hacer crecer en forma controlada, con corriente y potencial constante una película anódica de  $Al_2O_3$  sobre el Aluminio o sus aleaciones. Luego del anodizado viene la etapa de sellado, cuyo objetivo es sellar la boca de los poros de la capa anódica, siendo el método tradicional sumergir la probeta en agua a ebullición. Este trabajo consistió en obtener una capa anódica en 24 probetas, 12 de aleación AA-6063 y 12 de AA-8011, las cuales se anodizaron en ácido sulfúrico, siendo luego coloreadas y selladas con tres métodos diferentes, 8 probetas en agua destilada a ebullición, 8 en solución acuosa de Trietanolamina y 8 en solución acuosa de Acetato de Sodio. Los resultados obtenidos determinaron que los mayores espesores se presentaron en las probetas de AA-6063, selladas en agua destilada a ebullición. Posteriormente, la mitad de las probetas fueron sometidas a un ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética, dando como resultado, que las probetas selladas en solución de Acetato de Sodio exhibieron una menor velocidad de corrosión en comparación con los otros métodos de sellado y que las de la aleación AA-6063 presentaron una menor velocidad de corrosión comparadas a las de la aleación AA-8011.

---

**Palabras claves:** Anodizado, Sellado, Capa Anódica, Velocidad de Corrosión.

## EVALUATION OF THE RESISTANCE TO CORROSION OF ALUMINUM ALLOY AA 6063 AND AA 8011 ANODIZED USING SEALING DIFFERENT METHODS

**ABSTRACT:** The process used industrially to achieve the formation of a thick protective layer of aluminum is known as anodizing, which is growing in a controlled manner, with current and constant anodic potential a layer of  $Al_2O_3$  on aluminum or its alloys. Anodizing is carried out after the sealing stage, which aims to seal the mouth of the pores of the anodic layer, with the traditional method of dipping the specimen in boiling water. This work was to obtain an anodic layer in 24 specimens, 12 of AA-6063 alloy and 12 of AA-8011 alloy, which are anodized in sulfuric acid, being then stained and sealed with three different methods, 8 specimens in distilled water to a boil, 8 in aqueous solution of triethanolamine and 8 in aqueous solution of sodium acetate. The results determined that the greatest thicknesses are presented in the AA-6063 specimens sealed in boiling distilled water. Subsequently, half of the specimens were subjected to a corrosion test by total immersion in synthetic sea water, resulting in that the samples sealed in sodium acetate solution exhibited a lower corrosion rate compared to other methods sealed and that the alloy AA-6063 had a lower corrosion rate compared to those of the alloy AA-8011.

---

**Keywords:** Anodizing, Sealed, Anodic Layer, Corrosion Rate.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Aluminio es el tercer elemento más común en la corteza terrestre y es el metal no ferroso más usado, siendo la resistencia a la corrosión una de sus propiedades más relevante. La resistencia a la corrosión del Aluminio se debe a la formación espontánea de una capa de Óxido de Aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) con un espesor entre 30 y 100 Å (0,01 micras), lo que le confiere cierto grado de protección, por ser adherente y compacta, comportándose como una barrera que impide que los iones agresivos del medio ambiente actúen sobre el metal base y provoquen la corrosión. Sin embargo, la estabilidad de la capa protectora se ve afectada por sus propiedades químicas, la morfología del metal base, la morfología de la capa (porosidad) y su delgado espesor, por lo que se hace necesario un espesor de capa de mayor tamaño para proteger al Aluminio contra cualquier tipo de agentes corrosivos y así expandir su campo de aplicaciones.

El anodizado es la forma más óptima de proteger al Aluminio y sus aleaciones, lo cual se logra recubriendo su superficie con gruesas capas de Óxido de Aluminio de 8 hasta 30 micras ( $\mu\text{m}$ ), haciendo crecer en forma controlada, con corriente y potencial constante una película anódica de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sobre el Aluminio o sus aleaciones.

Posterior al anodizado el Aluminio es sometido a un proceso llamado sellado, en el cual se cierran las bocas de los poros de la capa protectora de Óxido, con lo cual se logra incrementar su capacidad anticorrosiva, al proteger el metal base del ambiente, aumentar la dureza de su superficie y hacer su apariencia externa más durable, lo cual hace que este proceso tenga una gran influencia en la resistencia a la corrosión que proveerá el anodizado al material cuando éste se encuentre en las condiciones de servicio.

Este trabajo de investigación consistió en evaluar la resistencia a la corrosión de aleaciones de Aluminio AA 6063 y AA 8011 anodizadas utilizando diferentes métodos de sellado, para lo cual se determinaron los espesores de las capas obtenidas con los diferentes métodos de sellado, la uniformidad de las capas y la velocidad de corrosión de cada probeta luego de ser sometidas a un ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

A continuación se explican de forma general las actividades más resaltantes consideradas en este trabajo.

### 2.1. Preparación e identificación de las Probetas antes del Anodizado

Se fabricaron 24 probetas, 12 probetas por cada aleación de Aluminio (AA 6063 y AA 8011) de un área frontal de 3 cm<sup>2</sup>. Luego, se decaparon con una solución alcalina de soda cáustica (Hidróxido de Sodio) al 8 % de concentración durante aproximadamente 5 minutos, para finalmente efectuar un neutralizado en una solución de Ácido Nítrico grado reactivo (65%) a temperatura ambiente durante 4 a 5 minutos, para garantizar que las probetas contaran con una superficie totalmente limpia, es decir, libre de aceites, grasas, polvo u otras partículas que estén adheridas a la superficie que impidan un buen anodinado.

### 2.2- Anodizado y Coloreado de las Probetas

Las probetas fueron anodizadas en una solución de Ácido Sulfúrico al 20% durante 40 minutos, a un potencial de 12 V y una densidad de corriente de 2 A/dm<sup>2</sup>. La temperatura fue mantenida en el intervalo  $22 \pm 4$  °C. El polo positivo de la fuente se conectó a la probeta a anodizar (ánodo) y el polo negativo a la placa de aluminio de 12 cm<sup>2</sup> de área (cátodo).Luego de ser anodizadas, las probetas fueron coloreadas con el uso de un tinte orgánico disuelto en agua destilada a 60 °C.

### 2.3- Sellado de las Probetas

Se realizaron 3 métodos diferentes para el sellado de las probetas anodizadas y coloreadas, con los parámetros que se indican en la Tabla 1. Para cada caso, se sometieron 8 probetas, 4 de aleación de Aluminio-AA 6063 y 4 de aleación de Aluminio AA-8011.

**TABLA 1.** Parámetros Operacionales utilizados para cada método de sellado

Método de Sellado	Temperatura (°C)	Tiempo (Minutos)	Composición del medio
Agua Destilada	97-100	20	100% agua destilada
Trietanolamina	80	8	Solución de 2 cm <sup>3</sup> de Trietanolamina por litro de agua
Acetato de Sodio	100	5	Solución de 1 gr de Acetato de Sodio por 1 litro de agua

#### 2.4- Ensayo de Corrosión y Cálculo de Velocidades de Corrosión de las Probetas

Se sometieron al ensayo de corrosión 12 de las 24 probetas anodizadas y selladas, 4 por cada método de sellado, para lo cual se sumergieron en una solución de 28,85 gr de Cloruro de Sodio (NaCl) y 6,15 gr de Cloruro de Magnesio (MgCl<sub>2</sub>) por litro de agua utilizado, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM G-31, para un tiempo de ensayo de 20 días, es decir, 480 horas.

Las probetas se pesaron antes y después del ensayo para el cálculo de las velocidades de corrosión, las cuales fueron calculadas mediante el uso de la ecuación (1) del indicador de pérdida de peso que provee la norma ASTM G-31 en su sección 11:

$$R = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (1)$$

#### 2.5. Identificación y Preparación de las probetas para ensayo Metalográfico

En la Tabla 2 se presenta la identificación dada a las probetas de la aleación AA-8011 y de la aleación AA-6063 que fueron anodizadas, coloreadas y selladas, tanto a las que fueron sometidas al ensayo de corrosión como a las que no se les aplicó. El estudio metalográfico se le realizó a 18 probetas, para así tener una muestra representativa en la observación de la capa anódica y la medición de los espesores de las mismas.

**TABLA 2.** Identificación de las probetas

	Tipo de Aleación	Tipo de Método de Sellado	N° de Probeta	
			Probeta N° 1	Probeta N° 2
<i>Sin aplicación del ensayo de corrosión</i>	AA-8011	Agua Destilada	A1	A2
		Solución de Trietanolamina	B1	B2
		Solución de Acetato de Sodio	C1	C2
	AA-6063	Agua Destilada	D1	D2
		Solución de Trietanolamina	E1	E2
		Solución de Acetato de Sodio	F1	F2
<i>Con aplicación del ensayo de corrosión</i>	AA-8011	Agua Destilada	A3	A4
		Solución de Trietanolamina	B3	B4
		Solución de Acetato de Sodio	C3	C4
	AA-6063	Agua Destilada	D3	D4
		Solución de Trietanolamina	E3	E4
		Solución de Acetato de Sodio	F3	F4

## 2.6. Medición del espesor de capa anódica por microscopía electrónica

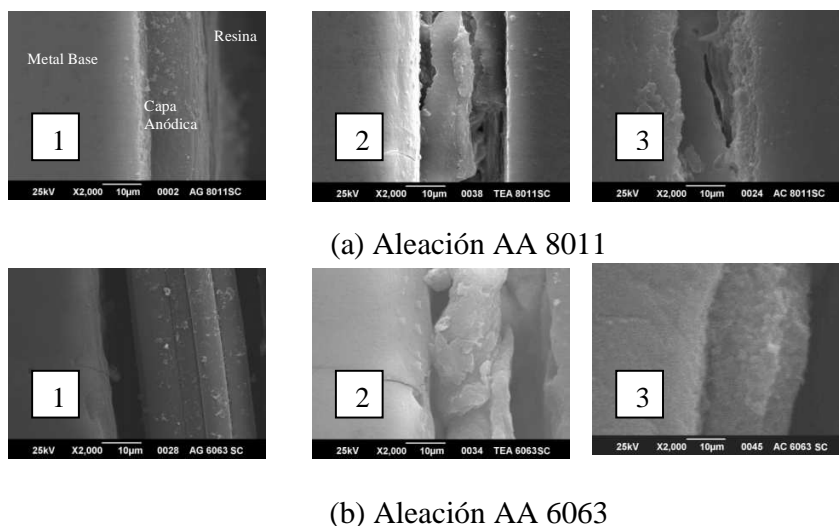
La medición del espesor de capa anódica fue realizada a través del uso del programa de diseño Autodesk INVENTOR 2011, utilizando las micrografías electrónicas realizadas a las probetas.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la inspección visual efectuada a las probetas anodizadas, coloreadas y selladas con los 3 métodos, sin ensayo de corrosión, se observó una coloración uniforme y brillante; luego de ser sometidas al ensayo de corrosión, el aspecto externo de las superficies presentaron pérdida de brillo u opacidad, pérdida de la intensidad del color en algunas zonas de la superficie, y manchas oscuras y de diferentes tonalidades. Este efecto fue mayor en las probetas de la aleación AA-8011 sin importar el método de sellado sobre las de la aleación AA-6063. Esto evidencia una mejor calidad de color, brillo y resistencia al manchado de las probetas anodizadas de ésta última aleación.

En el análisis metalográfico, puede apreciarse que el espesor de capa es aproximadamente uniforme en las micrografías de las probetas antes del ensayo de corrosión, como se observa en la Figura 1, por lo

que las mediciones de espesores realizadas para obtener los promedios exhibidos en las Tabla 3, no tuvieron una gran variación.



**FIGURA 1.** Microscopía Electrónica de Barrido realizada a las probetas anodizadas, coloreadas y selladas con los diferentes métodos, sin aplicación del ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética. (1) Sellada con agua destilada. (2) Sellada con Trietanolamina. (3) Sellada con Acetato de Sodio

Por otra parte, en la Tabla 3 se observa que los mayores espesores de capa se obtuvieron para las probetas de la aleación AA-6063, respecto a las de la aleación AA-8011, debido a que en el primer caso, los precipitados presentes en su microestructura son submicroscópicos y coherentes con la matriz, por lo cual los precipitados cercanos a la superficie a anodizar no tienen una gran influencia sobre el crecimiento de la capa, como sí ocurre en el segundo caso, donde grandes inclusiones en la zona cercana al borde de las mismas, crean durante el anodizado una zona de potencial diferente al resto de la superficie, lo cual dificulta el flujo de electrones y por tanto el crecimiento de la capa anódica.

Así mismo, en la Tabla 3 se aprecia la variación del espesor con respecto al tipo de método de sellado realizado, teniéndose los mayores espesores con el método de sellado tradicional en agua destilada a ebullición, respecto a los espesores de las capas selladas en solución de Trietanolamina y selladas en solución de Acetato de Sodio; esto debido al mayor tiempo de sellado al que fueron sometidas las probetas selladas en agua, dando más oportunidad a que una mayor proporción de Alúmina ( $Al_2O_3$ ) se hidrate para formar Alúmina Monohidratada o Bohemita ( $Al_2O_3 \cdot H_2O$ ) en las zonas más externas de la capa anódica, con lo que se tiene una mayor expansión volumétrica y por ello la obtención de mayores

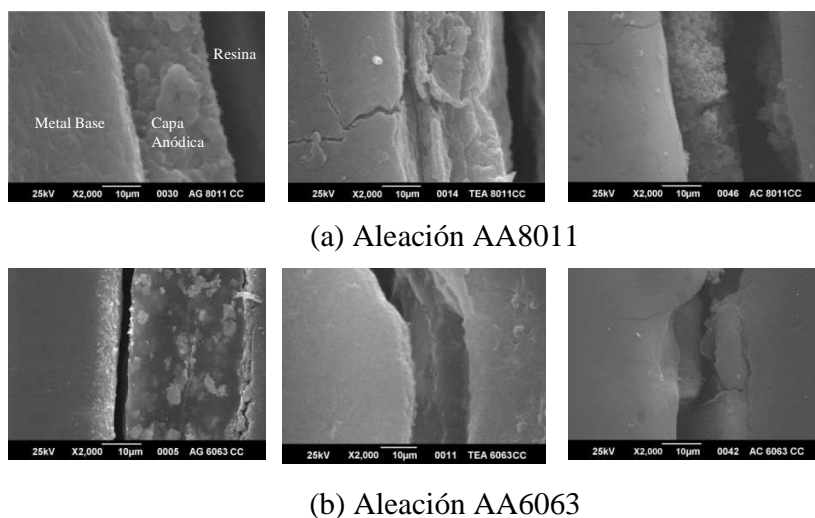
espesores; sin embargo, es de notar que para los casos de sellado en solución de Trietanolamina y Acetato de Sodio, con un tiempo de sellado 50% menor y una temperatura más baja en el primer caso y menos de la mitad del tiempo en el segundo caso, se hayan obtenido espesores de capa menores de apenas pocas micras, con lo que se comprueba que estos compuestos químicos son catalizadores activadores de la reacción de hidrólisis de la Alúmina.

**TABLA 3.** Espesores promedio de capa medidos para las probetas anodizadas, selladas y coloreadas sin ser sometidas al ensayo de corrosión

Tipo de Aleación	Tipo de Método de Sellado	Identificación de Probeta	Espesor Promedio ( $\mu\text{m}$ )
AA-8011	Agua Destilada	A1	24,83
		A2	24,05
	Solución de Trietanolamina	B1	23,91
		B2	23,55
Solución de Acetato de Sodio	C1	22,64	
AA-6063	Agua Destilada	D1	27,18
	Solución de Trietanolamina	E1	26,26
		E2	26,11
	Solución de Acetato de Sodio	F1	24,86

Luego de realizado el ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética, las micrográficas electrónicas que se encuentran en la Figura 2, exhiben capas anódicas deterioradas por la acción que los iones Cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) de la solución en las cuales se ensayaron, mostrando daños por corrosión como la pérdida de una textura compacta, obteniéndose capas extremadamente porosas, además de la pérdida del color de la capa en algunas zonas de la misma. Así mismo, en la mayoría de las micrográficas se observa agrietada transversal como longitudinalmente, la capa anódica.

En cuanto al espesor de las capas anódicas de las probetas sometidas al ensayo de corrosión, puede observarse en la Tabla 4, que el espesor en toda la extensión del tramo de capa anódica enfocada, es constante, con lo cual se pudieron tomar medidas correctas para obtener los promedios.



**FIGURA 2.** Microscopía Electrónica de Barrido realizada a las probetas anodizadas, coloreadas y selladas con los diferentes métodos, con aplicación del ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética. (1) Sellada con agua destilada. (2) Sellada con Trietanolamina. (3) Sellada con Acetato de Sodio

**TABLA 4.** Espesores promedio de capa medidos para las probetas anodizadas, selladas y coloreadas, sometidas al ensayo de corrosión

Tipo de Aleación	Tipo de Método de Sellado	Identificación de Probeta	Espesor Promedio ( $\mu\text{m}$ )
AA-8011	Agua Destilada	A3	20,78
		B4	20,89
	Solución de Trietanolamina	B4	21,02
		C3	20,56
AA-6063	Agua Destilada	C4	20,11
			D3
	Solución de Trietanolamina	D4	24,91
		E3	24,16
Solución de Acetato de Sodio	F3	23,41	

Los resultados de la pérdida de masa y la velocidad de corrosión de las probetas se muestra en la Tabla 5, donde la primera tendencia fácilmente observable es que las velocidades de corrosión presentadas por las capas anódicas de las probetas de la aleación AA-8011 son apreciablemente mayores a las de las probetas de la aleación AA-6063.



Las velocidades de corrosión reflejadas poseen una tendencia en cuanto al método de sellado utilizado en cada caso, y es que es apreciable que para las probetas selladas en agua destilada a ebullición, sus capas anódicas presentaron una mayor velocidad de corrosión que las capas selladas con los métodos alternativos de solución acuosa de Trietanolamina y solución de Acetato de Sodio, además comparando estos dos últimos métodos, las probetas selladas con el primer método arrojaron velocidades de corrosión más altas que las de las probetas selladas con el segundo método, manteniéndose esta tendencia para las dos aleaciones usadas.

**TABLA 5.** Espesores promedio de capa medidos para las probetas anodizadas, selladas y coloreadas sometidas al ensayo de corrosión

Tipo de Aleación	Método de Sellado	Ident. Probeta	Peso inicial (mg)	Peso Final (mg)	Pérdida de Peso (mg/gr)	Velocidad de Corrosión (mpy)
AA-8011	Agua Destilada	A3	4842	4832	10 / 0,01	3,08
		A4	4938	4929	9 / 0,009	2,77
	Trietanolamina	B3	4617	4610	7 / 0,007	2,23
		B4	4658	4652	6 / 0,006	1,88
	Acetato de Sodio	C3	4776	4771	5 / 0,005	1,57
		C4	4908	4902,5	5,5 / 0,0055	1,70
AA-6063	Agua Destilada	D3	4737	4730,5	6,5 / 0,0065	2,11
		D4	4855	4849,2	5,8 / 0,0058	1,82
	Trietanolamina	E3	4786	4780,8	5,2 / 0,0052	1,59
		E4	4813	4808,2	4,8 / 0,0048	1,46
	Acetato de Sodio	F3	4647	4643,2	3,6 / 0,0036	1,13
		F4	4712	4707,8	4,2 / 0,0042	1,31

Estos resultados pueden explicarse debido a que la reacción de hidrólisis de la Alúmina es más lenta en el sellado con agua destilada a ebullición que en los otros dos métodos, pues la Trietanolamina y el Acetato de Sodio actúan como catalizadores que aceleran esta reacción y permiten que sectores de las capas anódicas más cercanos al metal base se transformen en Alúmina Hidratada. En el sellado con agua, la hidrólisis se da en las zonas más externas de la capa donde al no tener restricciones se expande bruscamente en volumen hacia el exterior por la formación de moléculas de Bohemita, pero no se transforma la Alúmina de las zonas más cercanas al metal base.

#### 4. CONCLUSIONES

- La mayor pérdida de brillo de las probetas sometidas al ensayo de corrosión por inmersión total en agua de mar sintética se observa en las probetas de la aleación AA-8011.
- Los mayores espesores de capa anódica uniforme, observados y medidos con microscopía electrónica de barrido se obtuvieron para las probetas de la aleación AA-6063 y para el método de sellado de agua destilada a ebullición.
- El método de sellado más adecuado para disminuir la velocidad de corrosión en probetas de las aleaciones de Aluminio AA-6063 y AA-8011 anodizadas, es el sellado en solución de Acetato de Sodio.
- La aleación AA-6063 presentó una menor velocidad de corrosión comparada a la de la aleación AA-8011.

#### REFERENCIAS

- [1] Bartolomé, M.J; Feliu Jr, S; López, V; Escudero, E; González, J.A. y Feliu, S. 2006. “Efecto de las Heterogeneidades superficiales de Aluminio sobre el crecimiento y propiedades de las capas anódicas”. Revista de Metalurgia, Vol. 43, núm. 4, 252-265.
  - [2] Baustista A; Lizarbe R; Otero E; López V y González, J.A. 1999. “Nuevas alternativas a los métodos industrialmente implantados para el sellado del aluminio anodizado”. Revista de Metalurgia, Vol. 35, núm. 3, 195-202.
  - [3] Camacho, E. 2009. “Influencia de la densidad de corriente sobre el espesor de la capa de anodizado en diferentes aleaciones de Aluminio utilizando electrodo de Aluminio”. Trabajo de Grado de Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto.
  - [4] García, G. 2010. “Evaluación del espesor de capa de anodizado en diferentes perfiles de Aluminio, utilizando electrodos de Cobre, Níquel y Aluminio”. Trabajo de Grado de Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto.
  - [5] Grupo Pechiney. 1981. “Enciclopedia del Aluminio. Volumen 5. Procesos de Conformado del Aluminio y sus aleaciones II”, ediciones URMO, España.
  - [6] King, Frank. 1992. “El Aluminio y sus aleaciones”, Primera edición, editorial Limusa, México
- Hernández Jeanette, Leal Carlos. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE ALEACIONES DE ALUMINIO AA 6063 Y AA 8011 ANODIZADAS, UTILIZANDO DIFERENTES MÉTODOS DE SELLADO. Revista Digital de Investigación y Postgrado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Barquisimeto. Venezuela. Vol. 2 No. 5. Octubre 2012 Pp. 307-317 ISSN: 2244-7393. <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve>.*

D.F, México.

- [7] López V; Bautista A; Otero E y González J.A. 1996. “Envejecimiento del aluminio anodizado insuficientemente sellado”. Revista de Metalurgia, Vol. 32, núm. 5, 303-309.
- [8] Salcedo, E. 2009. “Influencia de la densidad de corriente sobre el espesor de la capa de anodizado en diferentes aleaciones de Aluminio utilizando electrodos de Acero Inoxidable”. Trabajo de grado de Ingeniería Metalúrgica. UNEXPO. Barquisimeto.
- [9] Wernik S. 1966. “Acabado y tratamiento superficial del Aluminio y sus aleaciones”, segunda edición, editorial River S.A, Madrid, España.
- [10] Zemanova M y Chovancova M. 2006. “Combinación de métodos de sellado en Aluminio anodizado”. Galvanotechnik, núm. 5, 1100-1103.