

Influencia de algunos factores sobre la calidad del anodizado de piezas de aluminio para la construcción.

J. A. Pérez García*, M. Sánchez Castro**

*Área de Ing. de los Procesos de Fabricación.

ETS de Ing. Industriales, Universidad. de Vigo, España.

** Dpto Tecnología de Construcción de Maquinarias, Facultad Ing. Mecánica, CUPJAE, La Habana, Cuba

E-mail: japerez@uvigo.es , mariano@mecanica.cujae.edu.cu

(Recibido el 4 de Junio de 2003; aceptado el 12 de Septiembre de 2003)

Resumen.

Ya ha sido establecido que de todos los factores que están presentes en el proceso de anodizado, hay tres que tienen la mayor preponderancia: el tratamiento previo de la superficie a anodizar, el color a aplicar y el espesor de la capa anodizada. A su vez, el primero de ellos es el que mayor influencia presenta. En este trabajo se presentan los resultados cuantitativos de la influencia de estos factores sobre la calidad de la superficie anodizada, expresada en función de los parámetros Ra, Ry y Rq de la superficie anodizada.

Palabras claves: Aluminio, anodizado, calidad.

1. Introducción.

Ya ha sido descrito [3] que durante el anodizado del aluminio con el objetivo de mejorar sus cualidades estéticas y de resistencia a la corrosión, de todos los factores presentes en el proceso hay tres que tienen la mayor relevancia de todos:

- El tratamiento previo de la superficie a anodizar.
- El color de la capa anodizada.
- El espesor de la capa anodizada.

Se encontró además, que el primero de ellos es el más influyente sobre el resultado final.

Por otra parte, también se ha establecido que existe influencia mutua entre estos factores señalados anteriormente por lo que su acción conjunta modifica o altera la influencia "pura" de cada factor por separado. De modo que de lo expresado se desprende la necesidad de establecer la relación cuantitativa que existe entre estos tres factores actuando simultáneamente y la calidad de las piezas anodizadas, expresada esta última en función de los parámetros Ra, Ry y Rq que caracterizan la resistencia a la corrosión, la textura y el aspecto, respectivamente.

2. Desarrollo.

La obtención de las relaciones cuantitativas entre los factores señalados y la calidad de la superficie anodizada, se sustenta en la ejecución de un experimento de diseño factorial en el que están consideradas todas las posibilidades de variación de los factores, dentro de límites que obedecen a restricciones o recomendaciones de la práctica industrial típica para estos procedimientos y que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.-Relación entre factores y niveles.

FACTOR	NIVELES				
Pre-tratamiento	Pulido	Nylon	Satinado	Gratado	Lijado
Color	Natural	Oro	Bronce		
Espesor Recubrimiento	15	25			

Los niveles expresados no numéricamente se codificaron convenientemente mediante indicadores numéricos para su procesamiento posterior. Como se observa, se requieren $5 \cdot 3 \cdot 2 = 30$ probetas, en cada una de las cuales se ha ejecutado el anodizado con una combinación singular de los factores. De cada probeta se prepararon tres réplicas y en cada una de las 90 probetas se midieron los parámetros Ra, Ry y Rq con cuyos valores se prepararon tablas que se ordenaron

convenientemente para su posterior procesamiento automatizado mediante el soft SPSS 8 [1]. Estas bases de datos aquí no se muestran por razón de espacio, pero están íntegramente contenidas en [3]. Todas las probetas fueron preparadas en condiciones típicas de este tipo de industria, por lo que el control de todos los parámetros del proceso se realizó por parte de los productores, excepto el de la medición de la rugosidad superficial de las probetas que se realizó en el laboratorio de Metrología de la Facultad de Ing. Industriales de la Universidad de Vigo, empleando para esto un rugosímetro marca SURFCOM mod. 1400A.

2.1. Análisis para el parámetro Ra.

Antes de comenzar el análisis es necesario establecer que:

- Como consecuencia de la diversidad de datos de la rugosidad inicial de las probetas por ser elaboradas con distintas condiciones de maquinado, se hace necesario realizar grupos para estudiar las posibles influencias en la rugosidad de las probetas sin anodizar. Estos grupos se corresponden con los distintos tratamientos previos de la superficie de las probetas.
- Es necesario valorar la conveniencia de proceder con regresiones de tipo lineal, cuadrática o exponencial a la hora de buscar la relación $Ra = f$ (factores) de la probeta analizada.

Para seleccionar cuál de las tres posibilidades de regresión se adecua mejor a las condiciones de este caso, se procede a realizar un análisis previo con el factor que muestra mayor influencia sobre el valor final de Ra, es decir, el pre-tratamiento. En la tabla 2 se muestran los resultados de este análisis previo.

Tabla 2.- Resultados del análisis.

Variable dependiente	Regresión	R ²	Grados libertad.	F	Signific.
Ra	Lineal	0.928	88	1140.33	0.000
Ra	Cuadrática	0.928	87	576.84	0.000
Ra	Exponencial	0.827	88	421.92	0.000

Se desecha la aproximación exponencial debido a que su coeficiente de correlación al cuadrado (R²) es el menor de los tres. Por otra parte, como entre las dos restantes aproximaciones no existen diferencias significativas, se selecciona finalmente la variante lineal por ser más sencilla. Aún cuando la intención y el cuidado se encaminan a tratar de lograr los experimentos con un alto grado de repetitividad, se sabe que en la instalación donde se llevaron a cabo los experimentos, que es de tipo industrial, hay condiciones normales de la misma que no favorecen este objetivo.

Por tanto, el análisis de regresión multifactorial lineal se efectuará por el método paso a paso que consiste en ir incorporando variables al modelo de forma tal que al introducir una nueva variable, se reevalúen todas mediante un contraste t (o F que es equivalente) [2]. Por tanto, la progresión de modelos estudiados es la siguiente (en todos los casos la variable dependiente es Ra final de la probeta anodizada):

Modelo A. Variable independiente:
Ra inicial

Modelo B. Variables independientes:
Ra inicial y color

Modelo C. Variables independientes:
Ra inicial, color y espesor del recubrimiento.

El análisis ANOVA para cada uno de estos modelos se muestra en la tabla 3.

Tabla 3.- Resultados del análisis de varianza.

Modelo		Suma cuadrados	Grados libertad	Media de cuadrados	F	Sig.
A	Regresión	13.450	1	13.450	1140.538	.000
	Residual	1.038	88	1.179E-02		
	Total	14.488	89			
B	Regresión	13.523	2	6.761	609.607	.000
	Residual	.965	87	1.109E-02		
	Total	14.488	89			
C	Regresión	13.568	3	4.523	422.952	.000
	Residual	.920	86	1.069E-02		
	Total	14.488	89			

En el contraste individual mediante el estadístico t se puede observar que, a medida que se incorporan variables (modelos B y C), los contrastes individuales son significativos y hacen aumentar levemente el grado de significación de la variable más importante del modelo, es decir, de Ra inicial. En la tabla 4 se muestra el resumen de los tres modelos analizados para la variable Ra final.

Tabla 4.- Resumen de los modelos analizados.

Modelo	R	R ²	R ² CORREGIDO	STD.ERROR
A	.964	.928	.928	.1086
B	.966	.933	.932	.1053
C	.968	.937	.934	.1034

En este resumen se admite que la diferencia entre los valores de correlación múltiple R y el coeficiente R² corregido va disminuyendo a medida que se introducen variables, por lo que se establecerá entonces un modelo de regresión múltiple que contemple las tres variables, o sea, del tipo C.

2.1.1. Diagnóstico del modelo.

Del análisis anterior se desprende que:

- Existe un alto índice de regresión múltiple (0,968).
- Existe un grado medio de significación (contraste F del análisis ANOVA) lo que indica que no todas las variables explicativas influyen por igual (claramente se observa la mayor influencia para Ra inicial).

En la tabla 5 se observa que los coeficientes del modelo son altamente significativos, ya que:

VIF < 10, o sea, ausencia de multicolinealidad

En la tabla 6 se observa que tanto las correlaciones como las covarianzas entre los factores estimados son despreciables.

En la tabla 7 no se observan problemas de multicolinealidad debido a que los coeficientes de correlación parcial son bajos.

En la tabla 8 se observa que todos los autovalores son mayores de 0,05 y los índices de condición son menores de 30. Por tanto, puede rechazarse la hipótesis de multicolinealidad.

Tabla 5.- Coeficientes de multicolinealidad.

	B	STD. Error	Beta	T	Sig.	Tolerancia	Vif
(Constante)	1.512E-02	.046		.327	.744		
Ra inicial	.757	.021	.964	35.466	.000	1.000	1.00
Color	3.483E-02	.013	.071	2.609	.011	1.000	1.00
Espesor	4.489E-03	.002	.056	2.059	.043	1.000	1.00

Tabla 6.- Coeficientes de correlación de factores estimados

		RA Inicial	Micras	Color
Correlaciones	Ra inicial	1.000	.000	.000
	Micras	.000	1.000	.000
	Color	.000	.000	1.000
Covarianzas	Ra inicial	4.560E-04	.000	.000
	Micras	.000	4.752E-06	.000
	Color	.000	.000	1.782E-04

Tabla 7.- Coeficientes de correlación 1-Tailed Sig.

		RA Inicial	Micras	Color
Correlaciones	Ra inicial	1.000	.000	.000
	Micras	.000	1.000	.000
	Color	.000	.000	1.000
Covarianzas	Ra inicial	4.560E-04	.000	.000
	Micras	.000	4.752E-06	.000
	Color	.000	.000	1.782E-04

Tabla 8.- Diagnóstico de colinealidad

Dimensión	Autovalor	Índice de Condición	Proporciones de la varianza			
			(Constante)	Color	Micras	Ra inicial
1	3.550	1.000	.00	.01	.01	.02
2	.289	3.504	.01	.06	.03	.90
3	.123	5.372	.01	.64	.35	.01
4	3.84E-02	9.610	.98	.29	.62	.06

El test de Durbin-Watson, con un resultado de 0.612, indica una leve autocorrelación positiva debido probablemente a no realizar los experimentos en las condiciones de aleatoriedad necesarias.

Se muestra el gráfico del diagnóstico de normalidad de los residuos en la figura 1.

Se observa de la figura 1 que se puede aceptar la hipótesis de normalidad de los residuos. El resumen de los mismos se muestra en la tabla 9.

Valores atípicos de influencia a priori.

Valor crítico de influencia (leverage)

$2(K+1)/n = 8/90 = 0,09$. Como en este análisis el máximo valor LEV es 0,06 se concluye que no hay valores atípicos de influencia a priori.

Influencia a posteriori.

Distancia Cook crítica = $F(4, 86, 0.95) = 3.10$. Como el máximo en este caso es 0,088, no se justifican influencias a posteriori.

DFFIT.

El valor crítico es $3((3+1)/90)^{1/2} = 0,63$. Todas las observaciones son menores que este valor. Por tanto se acepta la no existencia de observaciones influyentes a posteriori.

Error de especificación.

En los gráficos que siguen se representan los residuos frente al valor de Ra final y frente a los factores que intervienen (Ra inicial, color y espesor del recubrimiento)

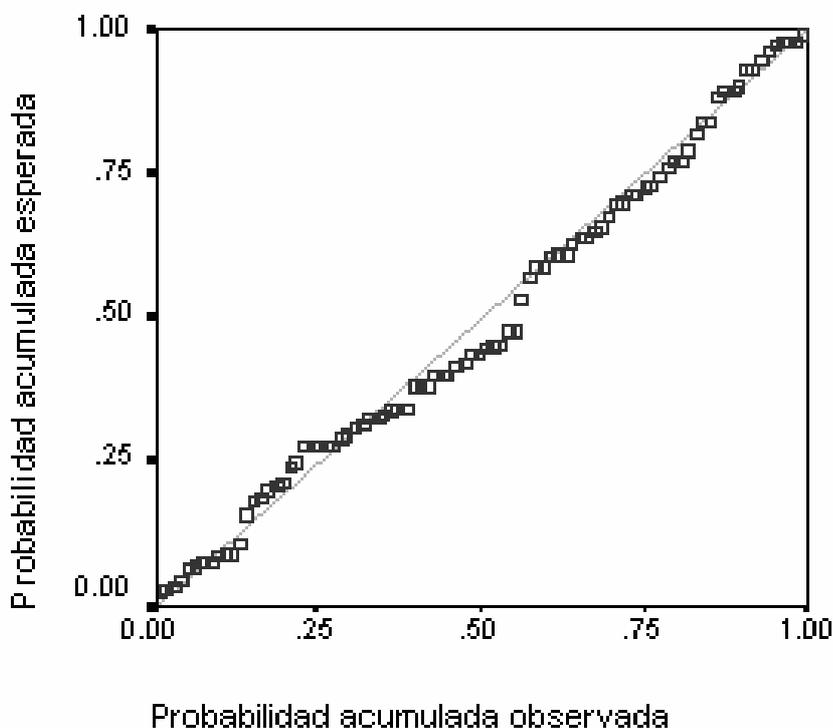


Figura 1.-Gráfico P-P Normal de regresión residuo tipificado. Variable dependiente: Ra Final
Diagnóstico de normalidad de los residuos.

Tabla 9.-Resumen de la hipótesis de normalidad de los residuos.

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica	N
Valor Pronosticado	.1365	1.4060	.6913	.3904	90
Distancia de Cook	.000	.088	.012	.018	90
Valores de Influencia	.011	.060	.033	.015	90

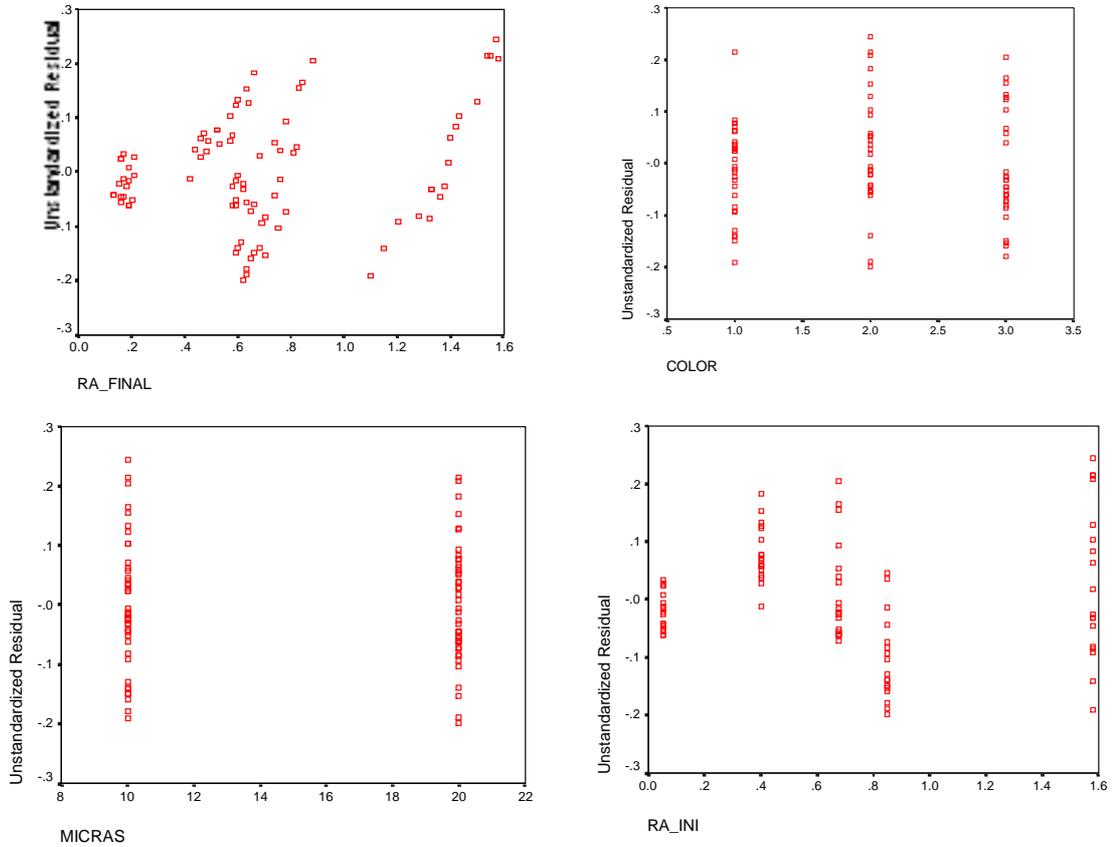


Figura 2.- Representación de los residuos frente al valor de Ra final y los factores que intervienen (Ra inicial, color y espesor del recubrimiento)

Como en los gráficos no se aprecia heterocedasticidad, la hipótesis de error de especificación puede ser rechazada.

Independencia y homocedasticidad.

En la figura siguiente se muestran los residuos frente a la variable respuesta estimada Ra.

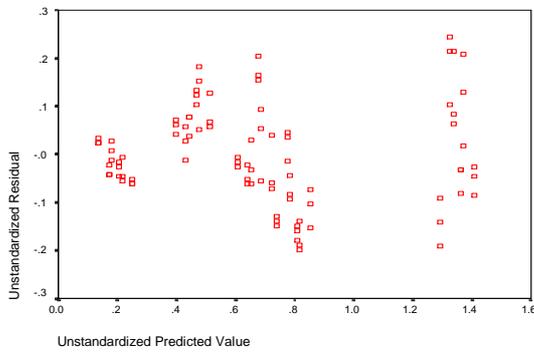


Figura 3.- Residuos frente a variable respuesta estimada Ra.

Por tanto, se puede asumir que el modelo de regresión es robusto.

2.1.2. Modelo de regresión lineal.

A partir de todo lo expuesto puede entonces plantearse la expresión siguiente:

$$Ra_{(probeta\ anodizada)} = A + B(color) + C(micras) + D(Ra) \quad (1)$$

Donde:

- A= 1,512 · 10⁻²
- B= 3,483 · 10⁻²
- C= 4,489 · 10⁻²
- D= 0,757

La variable color puede tomar los valores:

- Natural (1)
- Bronce (2)
- Oro (3)

La variable *micras* (espesor de recubrimiento) puede tomar los valores 10 o 20 mkm, que son los dos valores que comúnmente se emplean en estas producciones.

2.2. Análisis para los parámetros Ry y Rq.

Siguiendo el mismo esquema de cálculo que ya se ha mostrado para el caso del parámetro Ra, y utilizando los datos específicos de las mediciones que se hicieron para los parámetros Ry y Rq, se obtienen para estos dos parámetros los modelos de regresión lineal siguientes:

$$Ry_{(\text{probeta anodizada})} = A + B(\text{color}) + C(\text{micras}) + D(Ry) \quad (2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= 1,142 \\ B &= 0,236 \\ C &= 1,107 \cdot 10^{-2} \\ D &= 0,679 \end{aligned}$$

Los valores de las variables *color* y *micras* son los mismos que en el caso de Ra.

$$Rq_{(\text{probeta anodizada})} = A + B(\text{color}) + C(\text{micras}) + D(Rq) \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= 0,279 \\ B &= 2,183 \cdot 10^{-2} \\ C &= -6,22 \cdot 10^{-2} \\ D &= 0,730 \end{aligned}$$

También en este caso los valores de las variables *color* y *micras* se mantienen como en los dos anteriores.

3. Conclusiones.

Parámetro Ra.

El modelo obtenido tiene un alto coeficiente de correlación múltiple ($R=96,8\%$)

Al observar en la figura los valores reales frente a las predicciones se observa una adecuada tendencia de predicciones del modelo para este intervalo.

De la expresión matemática del modelo obtenido se concluye que la influencia del tratamiento previo es unas diez veces mayor que la mostrada por los otros dos factores y que además estos últimos muestran un peso similar.

Parámetro Ry.

El coeficiente de correlación múltiple es $R = 89,4\%$, al igual que en el caso anterior, el gráfico de valores reales (figura 5) frente a las predicciones muestra una tendencia adecuada de éstas.

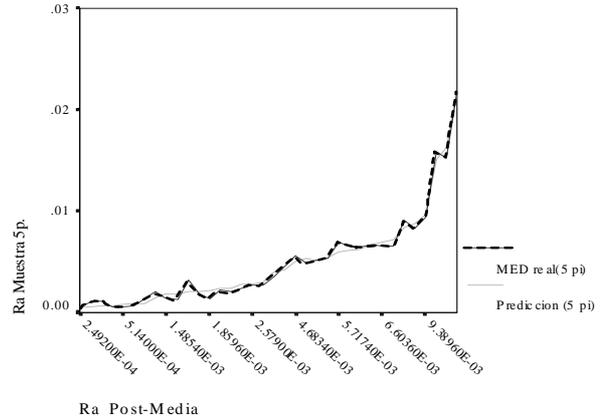


Figura 4.-Gráfico de los valores reales (media de 5 probetas) frente a las predicciones (muestra de 5 probetas).

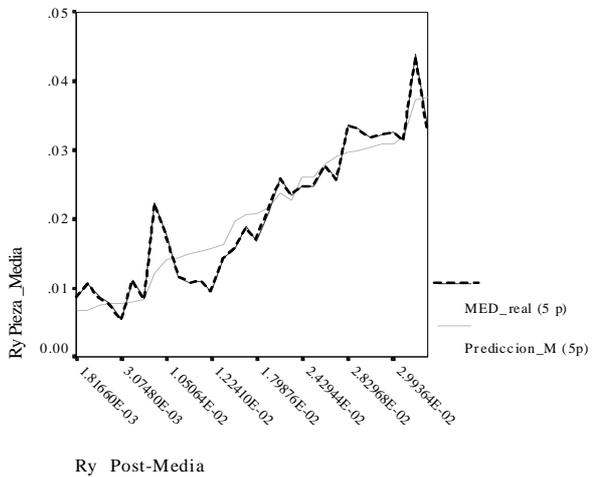


Figura 5.- el gráfico de valores reales frente a las predicciones muestra una tendencia adecuada de éstas.

Sobre este parámetro la mayor influencia la tienen los factores *pre-tratamiento* y *color*.

Parámetro Rq.

El coeficiente de correlación múltiple es tan alto ($R = 96,6\%$) como en el caso de Ra.

Del gráfico de valores reales frente a las predicciones se puede inferir, como en los casos anteriores, una adecuada tendencia de estas últimas.

Sobre este parámetro la mayor influencia la ejerce el factor *pre-tratamiento*. Se observa también que el factor *espesor del recubrimiento* influye inversamente sobre este parámetro, es decir, a mayor espesor de recubrimiento menor valor de Rq.

4. Bibliografía.

1. Peña Sánchez de Rivera D., "Estadística. Modelos y métodos II", Alianza Universidad Textos, 1998. ISBN 84206 8110-5.
2. Pérez, C "Técnicas estadísticas con SPSS". Prentice , may 2001. ISBN 8420531677.
3. Pérez García, J. A. "Análisis de la Influencia del Mecanizado Previo en la Calidad Superficial Final de Superficies de Aluminio Anodizadas". Tesis Doctoral. Universidade de Vigo, 2002

Influence of some factors over the quality of anodizing process of aluminum articles.

Abstract

It has been established that there are three factors with the most relevance in the anodizing process: Previous surface treatment, color and thickness of the anodized layer. Besides, the influence of the first of them is several times more important than the influence of the others. This paper presents the quantitative study of the influence of these factors over the quality of the anodized surface, expressed in terms of parameters Ra, Ry and Rq.

Key words: Aluminum, anodizing process, quality.