

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE RECUBRIMIENTOS DE GALVANIZADO ANTE LA VARIACIÓN DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

Manuel Pinzón Candelario¹, Miguel Angel Malaver Rivera²

¹SENA Regional Risaralda – Tecnoacademia, ²Universidad Tecnológica de Pereira

RESUMEN

El actual trabajo presenta el análisis del efecto de la temperatura, la corriente y el tiempo de exposición al baño electrolítico en recubrimientos obtenidos con el proceso de electrodeposición de Zinc sobre láminas de acero cold rolled. Para tal fin, se depositaron recubrimientos que se caracterizaron en términos de su espesor, dureza, adherencia y resistencia a la corrosión. A partir del análisis estadístico de los resultados experimentales se determinaron los rangos óptimos de operación para obtener los valores máximos de cada una de las características evaluadas. Se pudo concluir que los parámetros más influyentes en la calidad del recubrimiento son el tiempo y la corriente. Adicionalmente se presentan las gráficas que relacionan las variables (tiempo, temperatura y corriente) con el espesor obtenido, lo cual permite diseñar el proceso de galvanizado según las necesidades requeridas.

Palabras clave: Electrodeposición, zincado electrolítico, corriente, corrosión, adherencia.

ABSTRACT

This work presents the analysis of the temperature, current and exposure time effect to the electrolytic bath in coverings obtained with the process of Zinc electroplating on steel laminae cold rolled. For such aim, coverings were deposited that were characterized in terms of their thickness, hardness, adhesion and corrosion resistance. From the statistical analysis of the experimental results the optimal ranks of operation were determined to obtain the maximum values of each one of the evaluated characteristics. It was possible to be concluded that the most influential parameters in the quality of the covering are the time and the current. Additionally the graphs appear that relate the variables (time, temperature and current) with the obtained thickness, which allows to design the galvanized process of according to the required needs.

Keywords: Electrolytic, current electroplating, current, corrosion, adhesion.

1. INTRODUCCIÓN

El galvanizado es el depósito electrolítico de una capa fina de metal sobre un objeto. El cátodo es el objeto a ser cubierto y el electrolito es una solución acuosa de una sal del material galvanizante. El metal se deposita en el cátodo por reducción de los iones en la solución del electrolito. Estos cationes son aportados por una sal agregada o por la oxidación del ánodo que está hecho del metal a depositar [1].

Para la operación de los procesos se han establecido los valores de las variables operativas a partir de información secundaria tomada de referencias bibliográficas y con la asesoría de empresarios expertos en el tema. Sin embargo, no se habían determinado los valores óptimos de estas variables que

garantizaran la calidad de los recubrimientos depositados, por lo cual se propuso la metodología que aquí se presenta.

2. METODOLOGÍA

Inicialmente se cortaron probetas de 5x6 cm de acero AISI/SAE 1020 calibre 20 para ser galvanizadas en cada uno de los ensayos programados, esto para un área a recubrir de 60 cm².

Las variables operativas seleccionadas para el estudio y análisis son: temperatura del baño, corriente y tiempo de exposición. La evaluación de la calidad del galvanizado se realizará mediante su caracterización determinando: el espesor de capa, la micro indentación Vickers, su adherencia y el comportamiento a la corrosión en cámara de

niebla salina.

Para la formulación del diseño experimental se utilizó el programa StatGraphics Centurion XV, que adicionalmente fue la herramienta para realizar el análisis estadístico de los resultados. Para el desarrollo de la etapa experimental se plantea un diseño factorial, que permitirá establecer la manera en que las variables afectan los valores de respuesta, que en este caso son las propiedades del recubrimiento. El análisis factorial no solo permite estudiar la incidencia que cada variable presenta individualmente, sino que muestra los efectos que tienen las interrelaciones de éstas. En la Tabla 1 se muestran los valores ingresados al software estadístico los cuales constituyen las condiciones de las pruebas.

Variable	Nivel	Valor
Temperatura	Mínimo	40 °C
	Medio	45 °C
	Alto	50 °C
Intensidad de corriente	Mínimo	3.0 A
	Medio	3.5 A
	Alto	4.0 A
Tiempo	Mínimo	10 min
	Medio	12 min
	Alto	14 min

Tabla 1. Niveles y valores de las variables experimentales.

Algunos de los reactivos y electrolitos utilizados fueron donados por la Empresa BYCSA S.A. del sector de recubrimientos. Generalmente, la composición exacta de los baños y químicos comerciales es secreto industrial, pero las funciones generales de los componentes se conocen bien.

PREPARACIÓN SUPERFICIAL DE MUESTRAS PREVIA AL PROCESO DE RECUBRIMIENTO ELECTROLÍTICO.

Para obtener un resultado satisfactorio al depositar un metal sobre un sustrato es necesario llevar a cabo procedimientos previos al recubrimiento. En la Figura 1 se resumen los pasos que se siguieron para la preparación superficial de las probetas y en la Tabla 2 se presenta la composición de los baños.



Figura 1. Etapas de la preparación superficial de muestras previas al galvanizado.

- Tratamiento mecánico: desengrase con un paño, seguido de un pulido con una lija 320.
- Desengrase por inmersión: libera la pieza de grasas saponificables; ésta se agita durante 15 minutos sumergiéndola en el baño.

Proceso	Componente	Cantidad por litro
Desengrase por inmersión	Soda cáustica	40 g
	Carbonato sódico	25 g
	Fosfato Trisódico	10 g
	Metasilicato sódico	10 g
	Glicerina	2 g
Decapado	BYC OXA C	50 c.c.
	INIVEX 500	5 c.c.
Desengrase electrolítico	Kleanex 81N	70 g
Neutralizado	Ácido clorhídrico	100 g

Tabla 2. Composición de los baños para preparación superficial de muestras, previa a la electrodeposición de Zn [2].

- Enjuague: Los enjuagues en estos procesos se hacen por medio de agua en tanques separados para evitar el arrastre de sustancias a los procedimientos siguientes. [3]
- Decapado: Se realiza para eliminar capas de óxido superficial. Las piezas se sumergen en la solución agitando de manera ocasional durante aproximadamente 15 minutos, o hasta que las capas de óxido desaparezcan por completo.

- **Desengrase electrolítico:** Consiste en un mecanismo de limpieza de grasas, más rápido y profundo que el tratamiento de limpieza por inmersión sin aplicación de corriente; es por esto que se aplica como un paso adicional, posterior a la eliminación de grasas pesadas y abundantes que se lleva a cabo en el desengrase por inmersión. El proceso se realiza durante 60 segundos a una corriente de 6 Amperios y un potencial de 5 Voltios.

- **Neutralizado:** También conocido con el nombre de activado, se lleva a cabo como el paso final del procedimiento de preparación de la pieza antes de ser aplicado el recubrimiento. Después de haber pasado por el desengrase electrolítico y su respectivo enjuague, queda una película fina e invisible de óxido que pasiva la pieza disminuyendo su conductividad, esto haría necesaria la aplicación de una corriente mayor para aplicar el depósito; además, se debe eliminar esta capa de óxido, ya que se puede obtener un recubrimiento con una pobre adherencia. Se sumerge la pieza en la solución de 10 a 20 segundos agitándola manualmente.

Los pasos anteriores se aplicaron a todas las probetas antes del recubrimiento con Zn. Esta preparación superficial no se limita solo al galvanizado sino que se realiza antes de cualquier tipo de electrodeposición.

ELECTRODEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO DE ZINC

Los baños de recubrimiento electrolítico se dividen en ácidos y alcalinos. Los baños ácidos contienen sulfatos, cloruros, fluoroboratos y/o sulfamatos de los metales a depositar. Los baños alcalinos se componen sobre la base de complejos de hidróxidos o cianuros.

El baño utilizado es un baño de medio cianuro o de fuerza media. Para su preparación se tomaron como base manuales suministrados por el fabricante BYCSA S.A., obteniéndose un electrolito con la composición mostrada en la Tabla 3. La empresa BYCSA S.A. recomienda unas condiciones de operación de 40-50 °C y de 3-4 Amperios. El Zinc empleado para los ánodos es de alta pureza (99,9% Zn), tienen geometría rectangular de 12 cm x 10 cm de lado y 4 mm de espesor.

Elemento adicionado	Cantidad por litro
Cianuro de zinc	33 g
Cianuro de sodio	20 g
Soda caustica	80 g
Purzinc	4 c.c.
BZ 04 (abrillantador)	5 c.c.

Tabla 3. Composición del electrolito para Zincado.

La combinación de las variables presentadas en la Tabla 1 con sus tres niveles da un diseño experimental de 27 combinaciones o condiciones operativas para el galvanizado y de cada combinación se realizó un duplicado, lo que conduce a la preparación de 54 probetas. En la Tabla 4 se presentan a manera de ejemplo, algunas de las combinaciones del diseño experimental.

Probeta	Temperatura (°C)	Corriente (A)	Tiempo (min)
9	50	4,0	10
10	40	3,0	12
23	45	3,5	14

Tabla 3. Composición del electrolito para Zincado.

DETERMINACIÓN DE ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

El espesor de capa se determinó según la norma ASTM B767. El objetivo de la aplicación de los recubrimientos metálicos en la protección contra la corrosión, es brindar al metal base una capa que se corroa más rápido que el sustrato. Una capa gruesa de recubrimiento metálico, dura más que una capa delgada, es de allí que se desprende la importancia de brindar un espesor de recubrimiento adecuado, aunque la vida útil de algunas capas metálicas también depende de la porosidad.[4] El espesor se calcula a partir del peso, del área y de la densidad o peso específico del depósito utilizando la fórmula:

$$T (\text{espesor}) = C \frac{W (\text{peso})}{A (\text{área}) \cdot D (\text{peso específico})} \quad (1)$$

donde C es una constante que depende simplemente de las unidades utilizadas; al utilizar unidades métricas esta ecuación se transforma en:

$$T (\text{espesor}) = 10 \frac{W (g)}{A (cm^2) \cdot D} \quad (2)$$

para el caso del Zinc, el peso específico D es 7,125 g/cm³ y para las placas utilizadas el

área recubierta es de 60 cm². Con estos valores y tomando el peso de las placas antes y después del revestimiento electrolítico, se obtienen los valores del espesor.

DETERMINACIÓN DE DUREZA VICKERS DEL RECUBRIMIENTO

Para el desarrollo de este ensayo se empleó un equipo de microidentación que cumple con los requerimientos de la norma ASTM E384 “Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials”. Se realizaron tres mediciones y se promediaron para cada una de las probetas galvanizadas.

2.5 Determinación de adherencia del recubrimiento

La realización de una prueba de adherencia tras el proceso de revestimiento indica la fuerza con la que el revestimiento está afianzado en la superficie o en otra capa de revestimiento, o la fuerza de cohesión de algunos sustratos. En los procedimientos de inspección y mantenimiento se realizan pruebas rutinarias para poder detectar posibles defectos del revestimiento.

Para el desarrollo de las pruebas de adherencia, también llamadas ensayos de tracción, se utiliza el equipo presentado en la Figura 2 denominado “pull off”, el cual consiste en un instrumento que mide la fuerza a la cual se desprende un recubrimiento. El equipo utilizado es el “Defelsko® PosiTest® Pull-Off Adhesion Tester”, que cumple con los requerimientos establecidos en la norma ASTM D 4541 “Standard method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers”.



Figura 2. Equipo pull off para medidas de adherencia [5].

El procedimiento seguido se resume así:

- Preparación superficial: se deben eliminar las impurezas y grasas utilizando una lija

suave mediante un movimiento circular sobre la superficie inferior de los dados y un movimiento en cruz en el caso de las probetas.

- Pegado del dado y la probeta: se aplica pegante sobre la superficie limpia del dado para luego ubicarlo sobre la superficie de la muestra. El adhesivo utilizado es de marca 3M, referencia Scotch- Weld, adhesivo CA40; este se deja secar a temperatura ambiente durante 20 minutos.

- Apertura y cierre en la válvula de la bomba hidráulica: se posiciona el dado con el actuador del sistema de tracción del equipo y se procede a cerrar nuevamente la válvula.

- Desprendimiento del dado: paulatinamente se realiza un movimiento ascendente y descendente sobre la palanca de la bomba hasta lograr que el dado sea desprendido de la superficie.

- Lectura de resultado: se observa en la pantalla del equipo expresada en lb/pul² la presión que se requiere para despegar el dado de la superficie.

- Observación sobre el área de la falla: se realiza para estimar el porcentaje de película arrancado y el tipo de falla de la prueba, de adhesión o cohesión.

Para este ensayo se seleccionó el bloque 1 de probetas, es decir, de la 1 hasta la 27. Las demás serán objeto de la prueba de corrosión en cámara de niebla salina.

2.6 Ensayo de corrosión en cámara de niebla salina

Se empleó la cámara de niebla salina del laboratorio de corrosión de la Universidad Tecnológica de Pereira, bajo los parámetros que indica la norma ASTM-B 117 “Salt spray test”. Las condiciones del ensayo se citan en la Tabla 5.

Variable	Valor
Tiempo	72 horas
Temperatura	35 ±1 °C
Presión de pulverización	20 psi
pH de la solución	7
Concentración de NaCl en solución	5% en masa

Tabla 5. Condiciones de operación para el ensayo en la Cámara de Niebla Salina.

El tiempo de exposición se seleccionó según la norma ASTM- B-117. A las probetas en la cámara se les realizó seguimiento cada 24 horas, incluyendo un reporte fotográfico de su estado.

La forma en la que se expresa la cantidad de corrosión que ha sufrido un material, se ha ido acogiendo como un parámetro para medir su calidad. En la actualidad, esta cantidad, se expresa en unas unidades denominadas MPY por su sigla en inglés “Miles per year” o milésimas de pulgada de profundidad de ataque en un año. No obstante de ser ésta una magnitud cuantitativa, genera como resultado una calificación cualitativa. La forma de calcularla es con la ecuación:

$$MPY = 534 \frac{W}{D \cdot A \cdot T} \quad (3)$$

Donde W es la cantidad de peso perdido expresado en miligramos [mg]; D es la densidad del material [g/cm³] que para el Zinc es 7,13 g/cm³; A es el área expuesta a la corrosión expresada en pulgadas cuadradas [in²]; T es el tiempo de duración de la prueba expresado en horas.

Las unidades pueden ser expresadas en el sistema métrico y los resultados pueden compararse con la calificación establecida para la resistencia a la corrosión, según la Tabla 6. [2]

Resistencia a la corrosión	MPY	mm/año	micra/año
Sobresaliente	<1	<0.02	<25
Excelente	1-5	0.02-0.1	25-100
Bueno	5-20	0.1-0.5	100-500
Regular	20-50	0.5-1	500-1000
Malo	50-200	1-5	1000-5000
Inaceptable	200+	5+	5000+

Tabla 6. Equivalencia en sistema métrico de las MPY y calificación de la resistencia a la corrosión del recubrimiento.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El ingreso de los resultados experimentales al software estadístico permitió observar el efecto de las variables operativas y llegar al análisis que se presenta para cada una de las propiedades analizadas. A continuación se resumen los resultados más relevantes.

EFFECTO DE VARIABLES OPERATIVAS EN EL ESPESOR DE RECUBRIMIENTO

El análisis se realiza a partir del gráfico de efectos principales como el presentado en la

Figura 3. Se representa graficando el cambio estimado en la respuesta cuando cada uno de los factores varía desde su nivel inferior hasta su nivel superior; en este caso, cuando la corriente pasa de 3 a 4 A, cuando la temperatura pasa de 40 a 50 °C y cuando el tiempo se aumenta desde 10 hasta 14 minutos.

Las líneas indican el cambio estimado en el rendimiento conforme cada factor es movido de su nivel inferior a su nivel superior, manteniendo constante todos los demás factores con un valor a la mitad de sus respectivos niveles.

El efecto se define como el valor absoluto de la diferencia que existe entre el valor máximo y el valor mínimo obtenido de cada propiedad.

Así, en la Figura 3, se resumen los resultados relacionados con el espesor y se observa que el efecto principal de la temperatura en el espesor de Zinc es una disminución de 0,00046 mm, el de la corriente es una reducción de 0,00030 mm y el del tiempo es un aumento de 0,00090 mm.

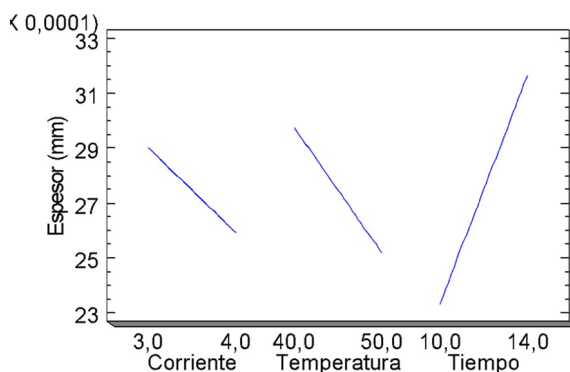


Figura 3. Efectos principales para el espesor del recubrimiento en el galvanizado.

Se puede concluir que el parámetro que más afecta el espesor es el tiempo de operación.

Un segundo análisis es realizado a partir del diagrama de Pareto estandarizado que muestra los efectos en orden de significancia decreciente, con una línea para determinar cuáles son estadísticamente significativos. Cualquier barra más allá de la línea vertical es estadísticamente significativa en el nivel de significancia establecido de forma predeterminada.

El resultado de los efectos principales para el espesor del recubrimiento coincide con el diagrama de Pareto estandarizado de la Figura 4, que indica que el único factor

estadísticamente significativo es el tiempo.

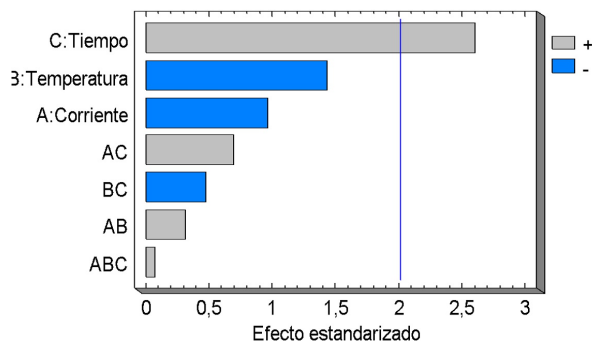


Figura 4. Gráfico de Pareto estandarizado para el espesor del recubrimiento en el galvanizado.

Posterior a la determinación de los efectos principales se realiza la optimización del proceso para cada propiedad, buscando las condiciones experimentales que dentro del rango evaluado puedan arrojar los valores mayores o menores dependiendo de la característica analizada. La Tabla 7 muestra el punto óptimo para obtener el mayor espesor posible dentro los rangos ensayados y la estimación del espesor obtenido bajo dichas condiciones. El espesor se estima a partir de la ecuación de regresión propuesta.

Espesor óptimo	0,00358256 mm
Factor Recomendable	
Corriente (I)	3 A
Temperatura (T)	40 °C
Tiempo (t)	14 min

Tabla 7. Valores óptimos para espesor del recubrimiento en el galvanizado..

Para cada propiedad del recubrimiento se obtienen los coeficientes de regresión que proporcionan un modelo ajustado para realizar una estimación previa a partir de la ecuación de regresión que se ha ajustado a los datos. En el caso del espesor, la ecuación es:

$$\text{Espesor} = 0.000945292 - 0.00104796 * I + 0.000135724 * T + 0.000730863 * t - 0.00001988 * I * T - 0.00002962 * I * t - 0.000022212 * T * t + 0.00000368 * I * T * t \quad (4)$$

Ya que el tiempo es la variable más significativa, se puede fijar su valor y aplicando la ecuación (4), se obtienen mapas que permiten predecir el espesor del galvanizado en mm, como se muestra en la Figura 5.

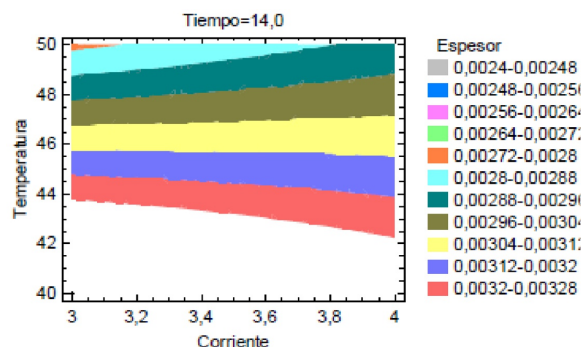


Figura 5. Respuesta estimada para espesor del recubrimiento en el galvanizado para t=14 min.

Para cada valor de tiempo se obtiene un mapa de respuestas estimadas. El análisis anterior se extiende a todas las características del recubrimiento que fueron analizadas.

Efecto de variables operativas en el valor de dureza Vickers del recubrimiento

Resumiendo los resultados obtenidos al tomar microindentación Vickers, se observa en la Figura 6 que el efecto principal de la temperatura en la dureza del recubrimiento de Zinc es una disminución de 6 HV, el de la corriente es una reducción de 1,4 HV y el del tiempo es un aumento de 17 HV.

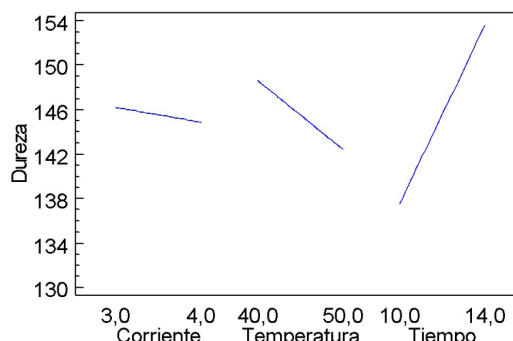


Figura 6. Efectos principales para la dureza Vickers del recubrimiento en el galvanizado.

De igual manera, se presenta el diagrama de Pareto estandarizado de la Figura 7, el cual coincide con la tendencia de los efectos principales para la dureza.

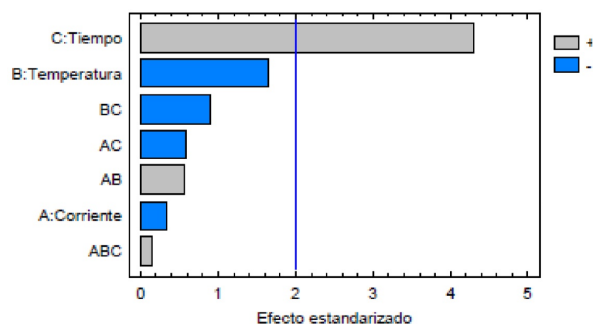


Figura 7. Gráfico de Pareto estandarizado para la dureza Vickers del recubrimiento en el galvanizado

Como en el caso del espesor, el factor significativo estadísticamente es el tiempo de electrodeposición. Las condiciones para obtener el valor óptimo se resumen en la Tabla 8.

Dureza óptima	162,384 HV
Factor Recomendable	
Corriente (I)	3 A
Temperatura (T)	40 °C
Tiempo (t)	14 min

Tabla 8. Valores óptimos para la dureza Vickers del recubrimiento en el galvanizado.

El modelo ajustado para realizar una estimación previa del valor de dureza a obtener es:

$$\begin{aligned} \text{Dureza} = & -106.225 + 34.4324 * I + 3.34397 * T + 30.526 * t - 0.427167 * I * T \\ & - 4.9386 * I * t - 0.48236 * T * t + 0.0791625 * I * T * t \end{aligned} \quad (5)$$

El mapa para predecir la dureza HV del recubrimiento correspondiente al tiempo óptimo se muestra en la Figura 8.

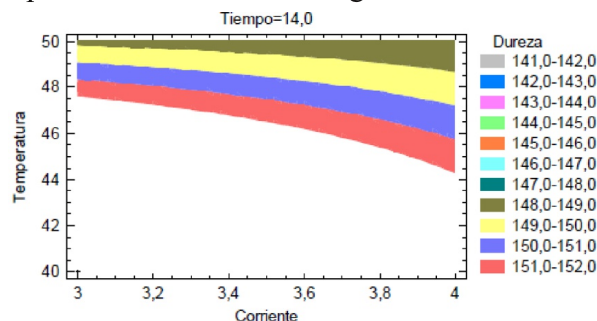


Figura 8. Respuesta estimada para la dureza Vickers del recubrimiento en el galvanizado para t=14 min.

EFEECTO DE VARIABLES OPERATIVAS EN EL VALOR DE ADHERENCIA DEL RECUBRIMIENTO.

En la Figura 9, se puede observar que el efecto principal de la temperatura en la adherencia de Zinc es un incremento de 20 psi, el de la corriente es una disminución de 2 psi y el del tiempo es un aumento de 36 psi.

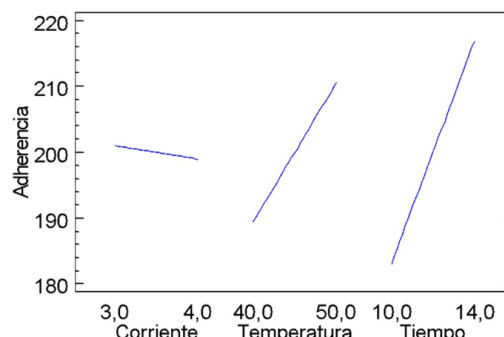


Figura 9. Efectos principales para la adherencia del recubrimiento en el galvanizado.

El gráfico de Pareto de la Figura 10, indica que no hay un factor estadísticamente significativo sobre la adherencia y que el que más afecta esta propiedad es el tiempo.

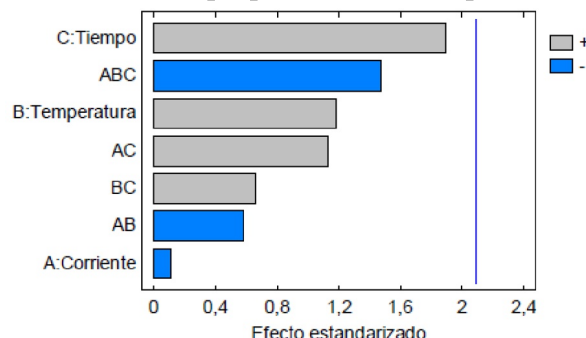


Figura 10. Gráfico de Pareto estandarizado para la adherencia del recubrimiento en el galvanizado

La adherencia óptima para los recubrimientos corresponde a su máximo valor y las condiciones para que esto suceda se muestran en la Tabla 9.

Adherencia óptima	249,463 psi
Factor Recomendable	
Corriente (I)	3 A
Temperatura (T)	50 °C
Tiempo (t)	14 min

Tabla 9. Valores óptimos para la adherencia del recubrimiento en el galvanizado.

El modelo para estimar el valor de la adherencia es:

$$\begin{aligned} \text{Adherencia} = & 7987.02 - 2169.11 * I - 163.622 * T - 689.472 * t + 44.8667 * I * T \\ & + 190.083 * I * t + 14.55 * T * t - 3.95 * I * T * t \end{aligned} \quad (6)$$

En la Figura 11 se presenta el mapa para predecir la adherencia del recubrimiento en el tiempo óptimo.

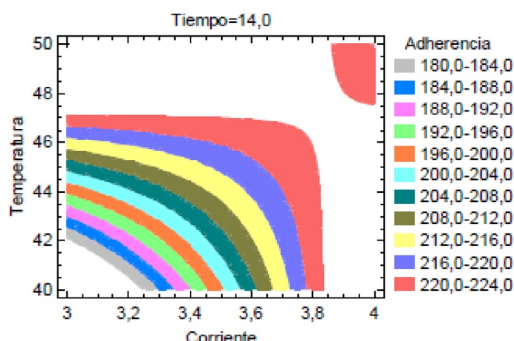


Figura 11. Respuesta estimada para la adherencia del recubrimiento en el galvanizado para t=14 min.

EFFECTO DE VARIABLES OPERATIVAS EN EL TIEMPO DE CORROSIÓN EN MPY DEL RECUBRIMIENTO.

En la Figura 12, se puede observar que el efecto de la temperatura en el valor de MPY es una reducción de 0,4, el de la corriente es una disminución de 3 y el del tiempo es un decrecimiento de 1 MPY.

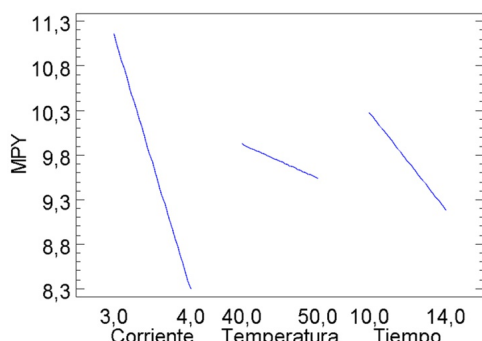


Figura 12. Efectos principales para la velocidad de corrosión en MPY del recubrimiento en el galvanizado.

Esta tendencia se comprueba con el diagrama de Pareto de la Figura 13 en el que se observa que el único factor estadísticamente significativo en la variación de la velocidad de corrosión es la corriente.

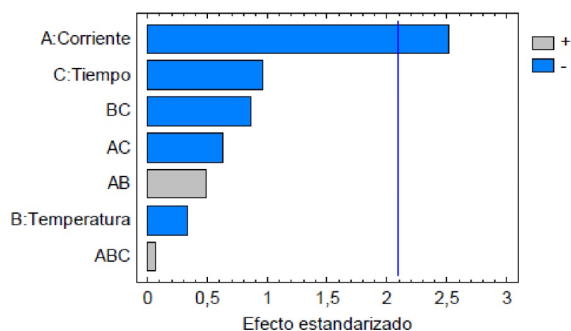


Figura 13. Gráfico de Pareto estandarizado para la velocidad de corrosión en MPY del recubrimiento en el galvanizado.

La Tabla 10 muestra el punto óptimo para obtener el mayor valor de resistencia a la corrosión posible dentro el rango analizado, teniendo en cuenta que en el caso de esta característica corresponde al mínimo valor de MPV que se pueda obtener.

Velocidad de corrosión óptima	6,93186
Factor Recomendable	
Corriente (I)	4 A
Temperatura (T)	50 °C
Tiempo (t)	14 min

Tabla 10. Valores óptimos para la velocidad de corrosión en MPY del recubrimiento en el galvanizado.

El modelo ajustado para estimar el valor de MPY relacionado con la velocidad de corrosión a obtener es:

$$\begin{aligned} \text{MPY} = & -29.6494 + 3.3615 * I + 0.762486 * T + 6.06955 * t - 0.0217025 * I * T \\ & - 1.03552 * I * t - 0.106967 * T * t + 0.0133013 * I * T * t \end{aligned} \quad (7)$$

La Figura 14 proporciona una respuesta estimada de la velocidad de corrosión dependiendo de las condiciones de operación del baño. En ese caso se pretende la ubicación en las zonas de color blanco que corresponderían a los mínimos valores de la pérdida de espesor del recubrimiento por acción de la corrosión.

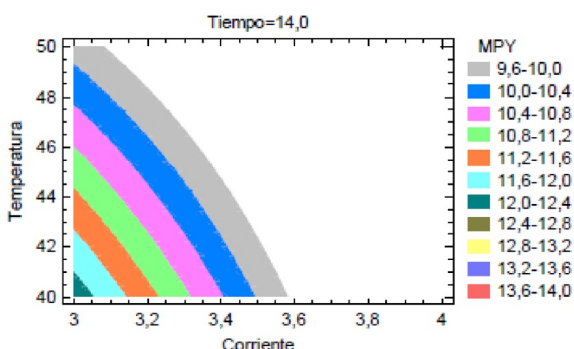


Figura 14. Respuesta estimada para la velocidad de corrosión en MPY del recubrimiento en el galvanizado para $t=14$ min.

4. CONCLUSIONES

Para obtener un espesor adecuado de la capa de Zn electrodepositada, el tiempo de permanencia en el baño durante el proceso es el factor más relevante, presentando mayores valores de espesor al aumentar esta variable.

La dureza del recubrimiento es afectada de manera significativa por el tiempo de proceso, al aumentar con el incremento en dicho factor.

Al analizar la adherencia de la capa de Zinc al sustrato, no hay un factor que tenga una incidencia estadísticamente significativa; sin embargo, al comparar el efecto de todos los factores, es el tiempo del proceso el que tiene una mayor incidencia en la variable respuesta.

En el caso del valor de MPY, es la corriente el factor que predomina en la respuesta relacionada con la velocidad de corrosión y al observar la incidencia de los demás factores va seguida del tiempo.

Para ninguna de las características evaluadas se encuentra la temperatura como un factor relevante. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el análisis se aplica para los rangos analizados.

Al reunir los efectos de todos los factores sobre las distintas propiedades, se podría decir que el resultado del espesor respecto al tiempo es predecible; sin embargo, lo interesante es que este aumento vendría acompañado de mayores valores de dureza y adherencia. Debido a que la corriente tiene un efecto irrelevante en estas propiedades, se puede seleccionar a partir de los requerimientos de protección contra la corrosión de la pieza o componente a galvanizar.

Se infiere que el recubrimiento ideal es aquel en el que se combinen: buenos valores de espesor que aseguren su durabilidad para la protección de la pieza, altos valores de dureza que proporcionen resistencia al desgaste y adicionalmente bajas velocidades de corrosión que refuercen su tarea protectora.

Se concluye entonces, que el tiempo y la corriente son las variables operativas más importantes en el diseño de un proceso de galvanizado.

El análisis estadístico de resultados obtenidos a partir de experimentación, permite obtener herramientas para el diseño y la optimización del galvanizado.

La experiencia de los aprendices y la facilitadora al dirigir una sesión en Clubes de Ciencia 2018: Jugando con la luz y compartir con los asistentes, fue extraordinaria. El ambiente que se genera por el trabajo colaborativo, en una inmersión de una semana, crea lazos entre sus participantes, que pueden durar mucho tiempo, como se evidencia en algunos aprendices que participaron en años anteriores. Los chicos del semillero de Robótica ven que su trabajo vale la pena y que sus conocimientos pueden ayudar a otros jóvenes como ellos, a que se interesen por las ciencias aplicadas.

Por otro lado el proceso de diseño, construcción, programación, prueba y documentación usando una metodología definida, ordenada y sistémica, permite que el prototipo mecatrónico realizado responda a lo concebido en las fases iniciales. Este proceso se ha venido implementando exitosamente en las sesiones de la Línea de Robótica de la Tecnoacademia, usando diferentes tipos de herramientas para la creatividad, la innovación y la validación de productos; por esta razón se elige este modo de prototipado para la experiencia en el Club.

La metodología y las herramientas de diseño e innovación por sí mismas no son de mucha utilidad, si las personas que las usan no poseen competencias para el trabajo colaborativo, entrenamiento creativo básico y empoderamiento; es por esto que el ambiente generado y la inmersión intensiva de los Clubes de Ciencia son el escenario perfecto para la apropiación de los conocimientos científicos y de investigación. Desde la Tecnoacademia Risaralda se propone, como actividad final del 2018, realizar un piloto de

Clubes de Ciencia por línea, en donde el resultado pueda darse a conocer a la comunidad educativa, los padres de familia y el SENA. Se pretende incorporar mas adelante a las sesiones en la Línea de Robótica, una mayor intreracción con otro tipo de sensores como el infrarrojo y el ultrasonido, para mejorar la experiencia de aprendizaje e incluir un diseño de experimentos para realizar algunas investigaciones por parte de los aprendices del semillero de la Tecnoacademia Risaralda, en la línea de Robótica que no solo se limite a realizar competencias de robots, sino que el diseño responda a una necesidad existente.

5. AGRADECIMIENTOS

Se hace un especial reconocimiento a la Universidad Tecnológica de Pereira y al Servicio Nacional de Aprendizaje SENA – Tecnoacademia Risaralda, que facilitaron sus recursos físicos y humanos para la realización del presente estudio.

6. REFERENCIAS

- [1] BLUM, William y George, B. Galvanotecnia y Galvanoplastia. 3a Ed. New York: McGraw-Hill, 2016. 527 p.
- [2] ANGARITA, Daniel; CARDONA, Jorge. Diseño y construcción de un banco para protección superficial de materiales por electrodeposición. Universidad Tecnológica de Pereira, Ed. 2010.150 p.
- [3] CNPMLTA, Centro Nacional de Producción más Limpia. Guía de producción más limpia para el sector de recubrimientos electrolíticos en Colombia. VersiónOnline.[Http://www.Guias%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20ambientales%20para%20recubrimientos%20electrol%C3%ADticos.pdf](http://www.Guias%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20ambientales%20para%20recubrimientos%20electrol%C3%ADticos.pdf)
- [4] BURNS, R. M y BRADLEY, W. W. Recubrimientos protectores de los metales. 1a Ed. España: Interciencias, 2016. 680 p.
- [5][Http://www.defelsko.com/technotes/DollyPreparation.htm](http://www.defelsko.com/technotes/DollyPreparation.htm)
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Guide for Determining Mass Per Unit Area of Electrodeposited and Related Coatings by Gravimetric and Other Chemical Analysis Procedures. ASTM B 767 – 88 (Reapproved 2001). Estados Unidos: ASTM, 2001. 6 p.
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING

- AND MATERIALS. Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM E 384 - 99E01. Estados Unidos: ASTM, 1999. 24 p.
- [8] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. ASTM D 4541 – 02. Estados Unidos: ASTM, 2002. 13 p.
- [9] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. ASTM B 117 – 03. Estados Unidos: ASTM, 2003. 10 p.
- [10] KUEHL, Robert. Diseño de experimentos: principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2a Ed. México: International Thomson Editores, S.A. de C.V., 2015. 666 p.