



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS  
DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE  
REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE  
QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**

**Edwin Roberto Cancinos Castillo**

Asesorado por Ing. César Alfonso García Guerra

Guatemala, julio de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS  
DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE  
REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE  
QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**EDWIN ROBERTO CANCINOS CASTILLO**  
ASESORADO POR ING. CÉSAR ALFONSO GARCÍA GUERRA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, JULIO DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benítez
EXAMINADOR	Ing. Jorge Rodolfo García Carrera
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha octubre de 2011.



Edwin Roberto Cancinos Castillo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 10 de mayo 2012

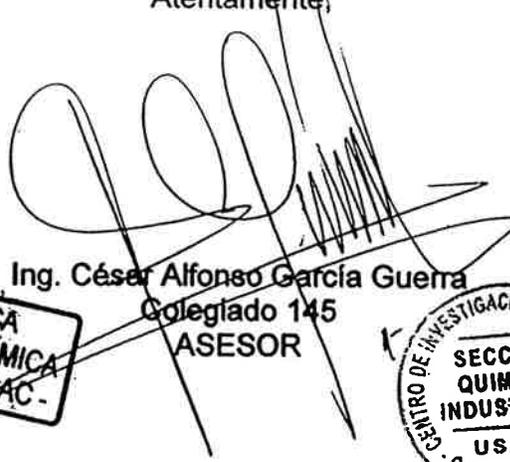
Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Álvarez:

Con un cordial saludo me dirijo a usted para informarle que he asesorado y aprobado el Informe final de Trabajo de Graduación titulado: "EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA". Elaborado por el estudiante de Ingeniería Química Edwin Roberto Cancinos Castillo con número de carné 200714367. Considero que el Informe final de Trabajo de Graduación desarrollado satisface los requisitos exigidos; por lo que solicito se sirva remitirlo para su respectiva revisión.

Agradezco a usted la atención a la presente.

Atentamente,

  
Ing. César Alfonso García Guerra  
Colegiado 145  
ASESOR

ÁREA DE QUÍMICA  
ESC. INGENIERÍA QUÍMICA  
FAC. INGENIERÍA - USAC -





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 30 de mayo de 2012  
Ref. EI.Q.TG-IF.030.2012

Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR  
Escuela Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-256-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Solicitado por el estudiante universitario: **Edwin Roberto Cancinos Castillo**

Identificado con número de carné: **2007-14367**

Previo a optar al título de **INGENIERO QUÍMICO**.

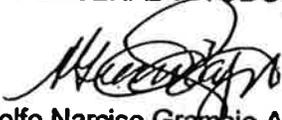
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FISIQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero: **César García Guerra**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

  
Ing. Adolfo Narciso Granajo Antonio  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación

  
ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
ACREDITADO POR  
Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería  
Período 2009 - 2012

  
ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de  
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **EDWIN ROBERTO CANCINOS CASTILLO** titulado: "EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, Julio de 2012

Cc: Archivo  
VMMV/ale

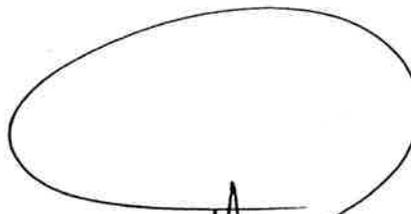


Facultad de Ingeniería  
Decanato

DTG. 355.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA,** presentado por el estudiante universitario **Edwin Roberto Cancinos Castillo,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, 25 de julio de 2012.

/gdech

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN E IMPLEMENTACIÓN PARA LA VALIDACIÓN TÉCNICA DE LOS ENSAYOS DE GALVANIZADO BAJO LAS NORMAS ASTM A90-81 Y ASTM A239-89, QUE SE REALIZAN EN EL LABORATORIO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO DE LA SECCIÓN DE QUÍMICA INDUSTRIAL DEL CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERÍA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha octubre de 2011.

Edwin Roberto Cancinos Castillo

## **ACTO QUE DEDICO A**

- Dios** Por ser mí guía y mí fuerza en el transcurso de mi vida. Por regalarme su amor y misericordia incondicionalmente.
- Mis padres** Ing. Edwin Rogelio Cancinos Sazo y Marta Eugenia Castillo Vásquez, por haber creído siempre en mí. Por sus consejos y su apoyo incondicional, sé que este triunfo los llena de orgullo.
- Mi hermano** Pablo Andrés Cancinos Castillo, te amo hermano, me has demostrado que se pueden alcanzar las metas, gracias por apoyarme en todo momento.
- Mi abuela** Marta Josefina Vásquez Soto por el amor y compañía que me da siempre, la que me recuerda que todo esfuerzo tiene su recompensa.
- Mis tíos y primos** Por estar siempre pendientes de mí y mis estudios, por su apoyo desde el inicio.

**En memoria**

Sonia Anabella Cancinos de Díaz (q.d.e.p.), Pedro Pablo Velásquez (q.d.e.p.), Rogelio Cancinos (q.d.e.p.), Elia Sazo (q.d.e.p.), Amanda Guerra (q.d.e.p.), Josefina Soto (q.d.e.p.), Ronald Bran (q.d.e.p.).

**Mis amigos y amigas**

Vladimir Pérez, Ana Beatriz Martínez, Esteban Suástegui, José Lira, Jorge Alejandro Díaz, Héctor Méndez, Carolina Corzo, Jaime Catalán, Brenda Barrios, Lucrecia Marroquín, Erick Barbaza, Ana Urbina, Liliana Cobaquil, Marian Mejía, María Fernanda Terraza, Jorge Estuardo Chavarría. Por compartir su amistad desde el inicio de este trayecto que hoy gratamente vemos cumplido.

**Ing. Qco. César García**

Por ser el mentor, tutor en mi formación académica, compartiendo sus vastos conocimientos y enseñándome el modelo de rectitud en todo momento.

**Licda. Ingrid Benítez**

Por ser tan amable conmigo y siempre brindarme todo su apoyo, Licda., la quiero mucho.

**Heidy Castillo**

Por ser tan especial para mí y considerarte como mi hermana, muchas gracias por todo tu cariño.

**Presbítero Tomas Tomás**

Por estar siempre al lado de mi familia  
brindándonos su apoyo.

## AGRADECIMIENTOS

<b>Dios</b>	Por derramar los dones y frutos del Espíritu Santo en mí. Por darme su fuerza para levantarme y continuar.
<b>Mi país</b>	Por ser la tierra que me vio nacer, espero devolverle todo lo que me ha dado y permitirme ser productivo para ella.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi <i>alma mater</i> e imprimir en mí conciencia y responsabilidad social para mi país.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por haberme forjado como un profesional y haberme permitido alcanzar mis conocimientos.
<b>Escuela de Ingeniería Química</b>	Por orientarme hacia los mejores conocimientos teóricos y prácticos.

## **Ingenieros**

Jorge Mario Estrada, Otto Raúl De León, Adolfo Gramajo, Estuardo Monroy, Manuel Galván, Jorge García, Adrián Soberanis. Agradezco el haber tenido los mejores profesores en su área y sobre todo tan excelentes personas como son.

# ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS / HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ANTECEDENTES.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Validación.....	5
2.1.1. Parámetros para la validación de un ensayo.....	7
2.2. Oficina de Acreditación Guatemalteca – OGA-GEC-016.....	8
2.3. ASTM Internacional.....	10
2.4. Laboratorio de la sección de Química Industrial.....	11
2.5. Corrosión.....	12
2.5.1. Definición y alcance.....	12
2.5.2. Mecanismos básicos de la corrosión.....	13
2.5.3. Reacciones químicas de la corrosión.....	14
2.5.4. Ataque electroquímico: celdas galvánicas.....	18
2.5.5. Formas específicas de corrosión.....	20
2.5.5.1. Picadura.....	20
2.5.5.2. Ataque intergranular.....	21
2.5.5.3. Descincado.....	22
2.5.5.4. Corrosión-erosión.....	22

2.6.	Galvanizado .....	23
2.6.1.	Tipos de baños galvánicos .....	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO .....	27
3.1.	Variables .....	27
3.2.	Delimitación del campo de estudio .....	28
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	28
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	28
3.4.1.	Reactivos y muestras .....	28
3.4.2.	Equipo y cristalería .....	29
3.5.	Técnica cuantitativa.....	29
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información. ....	29
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información....	30
3.7.1.	Análisis de muestra bajo la Norma ASTM A90-81.....	30
3.7.1.1.	Manejo experimental .....	30
3.7.1.2.	Preparación de la muestra.....	30
3.7.1.3.	Procedimiento.....	31
3.7.1.4.	Manejo de productos y residuos.....	31
3.7.1.5.	Resultados esperados .....	32
3.7.2.	Análisis de muestra bajo la Norma ASTM A239-89....	32
3.7.2.1.	Manejo experimental .....	32
3.7.2.2.	Preparación de la muestra.....	33
3.7.2.3.	Procedimiento.....	33
3.7.2.4.	Manejo de productos y residuos.....	34
3.7.2.5.	Resultados esperados .....	34
3.7.3.	Determinación de la linealidad.....	34
3.7.4.	Determinación de la exactitud .....	35
3.7.5.	Determinación de la precisión .....	35
3.7.6.	Determinación de la especificidad .....	35

3.7.7.	Determinación de los límites de cuantificación, detección y repetitividad .....	35
3.7.8.	Determinación de la robustez .....	36
3.7.9.	Programas utilizados para el análisis estadístico.....	37
3.8.	Análisis estadístico. ....	37
4.	RESULTADOS.....	39
4.1.	Diagnóstico inicial de las condiciones, recursos, materiales metrológicos, legales y de gestión del laboratorio de la sección de Química Industrial .....	39
4.2.	Requisitos técnicos para la validación de los ensayos de galvanizado.....	40
4.2.1.	Exactitud .....	40
4.2.1.1.	Norma ASTM A90-81.....	40
4.2.1.2.	Norma ASTM A239-89.....	41
4.2.2.	Precisión .....	43
4.2.2.1.	Norma ASTM A90-81.....	43
4.2.2.2.	Norma ASTM A239-89.....	44
4.2.3.	Selectividad.....	44
4.2.4.	Linealidad.....	45
4.2.4.1.	Norma ASTM A90-81.....	45
4.2.4.2.	Norma ASTM A239-89.....	46
4.2.5.	Límite de cuantificación, detección y repetitividad .....	46
4.2.5.1.	Norma ASTM A90-81.....	47
4.2.5.2.	Norma ASTM A239-89.....	47
4.2.6.	Robustez.....	48
4.2.6.1.	Norma ASTM A90-81.....	49
4.2.6.2.	Norma ASTM A239-89.....	50

4.2.7.	Análisis de varianza, prueba de Tukey, prueba de Fisher y DMS.....	51
4.2.7.1.	Norma ASTM A90-81 .....	51
4.2.7.1.1.	Análisis de varianza.....	51
4.2.7.1.2.	Prueba de Fisher y DMS ....	52
4.2.7.1.3.	Prueba de Tukey .....	53
4.2.7.2.	Norma ASTM A239-89 .....	53
4.2.7.2.1.	Análisis de varianza.....	54
4.2.7.2.2.	Prueba de Fisher y DMS ....	58
4.2.7.2.3.	Prueba de Tukey .....	62
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES.....	73
	RECOMENDACIONES .....	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICE .....	79

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Cobertura vrs. cambio de espesor para Norma ASTM A90-81 .....	45
2.	Espesor vrs. número de baños para Norma ASTM A239-89 .....	46
3.	Análisis de cobertura respecto al cambio de espesor para Norma ASTM A239-89.....	49
4.	Análisis de espesor respecto al número de baños para Norma ASTM A239-89.....	50

### TABLAS

I.	Definición operacional de las variables para la validación de los ensayos de galvanizado.....	27
II.	Análisis de varianza .....	37
III.	Error relativo porcentual (%ER) para cálculo de cobertura .....	41
IV.	Error relativo (%ER) para Norma ASTM A239-89 para IC-1, IC-2, IC-3 e IC-4.....	42
V.	Error relativo porcentual (%ER) para Norma ASTM A239-89 para IC-5, IC-6, IC-7 e IC-8 .....	42
VI.	Error de precisión (%ER) para Norma ASTM A90-81 .....	43
VII.	Error de precisión porcentual (%ER) para Norma ASTM A239-89.....	44
VIII.	Límites para Norma ASTM A90-81 .....	47
IX.	Límites para Norma ASTM A239-89 .....	48
X.	Análisis de la varianza.....	51
XI.	Cuadro de análisis de la varianza (SC Tipo III) .....	52

XII.	Análisis de prueba de Fisher y DMS .....	52
XIII.	Análisis de prueba de Tukey .....	53
XIV.	Análisis de la varianza para espesor inicial.....	54
XV.	Cuadro de análisis de la varianza para espesor inicial .....	54
XVI.	Análisis de la varianza para primer baño .....	54
XVII.	Cuadro de análisis de la varianza para primer baño .....	55
XVIII.	Análisis de la varianza para segundo baño.....	55
XIX.	Cuadro de análisis de la varianza para segundo baño .....	55
XX.	Análisis de la varianza para tercer baño .....	56
XXI.	Cuadro de análisis de la varianza para tercer baño .....	56
XXII.	Análisis de la varianza para cuarto baño .....	56
XXIII.	Cuadro de análisis de la varianza para cuarto baño .....	57
XXIV.	Análisis de la varianza para quinto baño.....	57
XXV.	Cuadro de análisis de la varianza para quinto baño .....	57
XXVI.	Análisis de la varianza para espesor final .....	58
XXVII.	Cuadro de análisis de la varianza para espesor final.....	58
XXVIII.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para espesor inicial .....	59
XXIX.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para primer baño .....	59
XXX.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para segundo baño .....	60
XXXI.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para tercer baño .....	60
XXXII.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para cuarto baño .....	61
XXXIII.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para quinto baño .....	61
XXXIV.	Análisis de la prueba de Fisher y DMS para espesor final.....	62
XXXV.	Análisis de la prueba de Tukey para espesor inicial .....	63
XXXVI.	Análisis de la prueba de Tukey para primer baño.....	63
XXXVII.	Análisis de la prueba de Tukey para segundo baño .....	64
XXXVIII.	Análisis de la prueba de Tukey para tercer baño.....	64
XXXIX.	Análisis de la prueba de Tukey para cuarto baño .....	65
XL.	Análisis de la prueba de Tukey para quinto baño .....	65

XLI.	Análisis de la prueba de Tukey para espesor final .....	66
XLII.	Códigos y analistas para la intercomparación de muestras .....	81



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
<b>A</b>	Área
$\Delta E$	Cambio de espesor
<b>C</b>	Cobertura
$\rho$	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
<b>E<sub>o</sub></b>	Espesor inicial
<b>E<sub>f</sub></b>	Espesor final
<b>g</b>	Gramos
<b>W<sub>f</sub></b>	Peso final
<b>W<sub>o</sub></b>	Peso inicial
<b>W<sub>hr</sub></b>	Peso hoja de referencia
%	Porcentaje
<b>I</b>	Número de inmersiones

**V**

Volumen

## **GLOSARIO**

<b>Analito</b>	Especie de interés a mejorar en un análisis.
<b>Calibración</b>	Conjunto de operaciones que permiten establecer, en condiciones específicas, la relación existente entre los valores indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o un material de referencia, y los valores correspondientes obtenidos mediante un patrón de referencia.
<b>Desviación</b>	Error sistemático de un proceso de medición.
<b>Ensayo/ Prueba</b>	Determinación de una o más características de acuerdo con un procedimiento.
<b>Exactitud</b>	Grado de concordancia entre el valor aceptado como un valor verdadero convencional, o un valor de referencia, y el valor encontrado.
<b>Guías</b>	Documentos que establecen recomendaciones.

<b>Linealidad</b>	Capacidad de un método analítico para generar resultados directamente proporcionales al valor del parámetro de la muestra, dentro de un rango.
<b>Límite de cuantificación</b>	Valor mínimo del analito en la matriz de una muestra que puede ser cuantificada con una exactitud y precisión aceptable bajo condiciones analíticas específicas.
<b>Límite de detección</b>	Valor mínimo del analito en la matriz de una muestra que puede ser detectada, pero no necesariamente cuantificada, bajo condiciones analíticas específicas.
<b>Método normalizado</b>	Método analítico desarrollado por un organismo de normalización u otro organismo reconocido cuyos métodos son generalmente aceptados por el sector técnico correspondiente.
<b>Precisión</b>	Grado de concordancia entre los valores de una serie repetida de ensayos, utilizando una muestra homogénea, bajo condiciones establecidas.
<b>Registros</b>	Documento que presenta resultados obtenidos o proporciona evidencia de actividades desempeñadas.

<b>Repetitividad</b>	Grado de concordancia entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas en las mismas condiciones de medición.
<b>Reproducibilidad</b>	Grado de concordancia entre los resultados de mediciones del mismo mesurando realizadas en diferentes condiciones de medición.
<b>Robustez</b>	Capacidad de un procedimiento analítico de no ser afectado por pequeñas pero deliberadas variaciones en los parámetros del método provee una indicación de su confiabilidad en condiciones de uso normales.
<b>Selectividad</b>	Capacidad de un método de detectar simultáneamente o separadamente analitos diferentes presentes en una misma muestra.
<b>Trazabilidad</b>	Propiedad del resultado de una medición o el valor de un patrón por medio de la cual éste puede ser relacionado con los patrones de referencia, usualmente patrones nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, teniendo establecidas las incertidumbres.

**Validación**

Confirmación mediante el suministro de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos para una utilización o aplicación específica prevista.

## RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar e implementar la validación técnica en la realización de los Ensayos de Galvanizado, que se llevan a cabo en el Laboratorio de Química Industrial (USAC), con base en las Normas ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado), para artículos de hierro o acero y ASTM A239-89 Método de ensayo estándar, para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre).

Se realizó para la Norma ASTM A90-81 la evaluación del Método alternativo (ácido clorhídrico 50%v-50%v agua), como agente decapante para las muestras de lámina de galvanizado. Se tomaron medidas de longitud y peso como parte del análisis. Mientras que para la Norma A239-89 se utilizó sulfato de cobre (36 gramos de sulfato de cobre en 100 gramos de agua), permitiendo que la muestra fuera sumergida en baños de 1 minuto hasta que se presentó el punto final, identificado por un color brillante. Para ambas normas se realizó una intercomparación de resultados, con 8 analistas y muestras triplicadas para cada uno.

El estudio determinó la validación del ensayo de galvanizado bajo los parámetros de linealidad, exactitud, precisión, selectividad, robustez, límites de detección, de repetitividad y de cuantificación. Al realizar el análisis estadístico se logró determinar que no existe diferencia significativa en los resultados, por lo que el método es preciso y válido para su implementación.



# OBJETIVOS

## General

Evaluar e implementar la validación técnica de los ensayos de galvanizado, que se realizan en el Laboratorio de Análisis Físicoquímico de la sección de Química Industrial (USAC), según las Normas ASTM A90-81 y ASTM A239-89.

## Específicos

1. Realizar un diagnóstico inicial de las condiciones, recursos, materiales metrológicos, legales y de gestión dentro del Laboratorio de Química Industrial.
2. Determinar la exactitud, precisión y especificidad de los ensayos de galvanizado para un nivel de confianza del 95%, utilizando muestras estándares certificadas.
3. Determinar la linealidad utilizando una gráfica de Cobertura versus Espesor.
4. Determinar el límite de detección, límite de repetitividad y el límite de cuantificación para los ensayos de galvanizado.
5. Determinar la robustez de los ensayos de galvanizado por medio de la gráfica de espesor versus cobertura.

6. Realizar el análisis de varianza y la prueba de Tukey para determinar la validez del experimento.

## HIPÓTESIS

Es posible evaluar e implementar la validación técnica correspondiente en la realización de los ensayos de galvanizado, para su correcta validación técnica, según las Normas de análisis ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado), para artículos de hierro o acero y ASTM A239-89 Método de ensayo estándar para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre).

### Hipótesis estadística

**Ho:** no existe diferencia significativa dentro de los resultados en la intercomparación de los analistas durante la realización de los ensayos de galvanizado.

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0$$

**Hi:** existe diferencia significativa dentro de los resultados en la intercomparación de los analistas durante la realización de los ensayos de galvanizado.

$$\mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \neq 0$$

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, debido a los requerimientos normativos internacionales es necesario contar con laboratorios que tengan implementado un sistema de gestión de la calidad que aumente la confiabilidad de los resultados de los ensayos, que permita demostrar su competencia técnica y que fortalezca su posición competitiva a partir de una mejor administración de los recursos. El Laboratorio de la Sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería no es la excepción, ya que necesita implementar la validación técnica correspondiente a los distintos ensayos experimentales que realiza y que es exigida por un sistema de gestión de calidad.

El presente trabajo pretende establecer las pautas para validar los Ensayos de Galvanizado bajo las Normas de análisis ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado), para artículos de hierro o acero y ASTM A239-89 Método de ensayo estándar para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre).

La validación es uno de los puntos vitales para el cumplimiento de las normas en un sistema de gestión de la calidad. El Laboratorio de Análisis Físicoquímico se encuentra implementándolo para el período 2012-2015, acreditado por la Agencia Centroamericana de Acreditación de Programas de Arquitectura e Ingeniería (ACAAI). Este proceso de acreditación supone una serie de requisitos técnicos y administrativos que se encuentran, regulados, actualmente, bajo la norma técnica guatemalteca OGA-GEC-016.

Para el Laboratorio de la Sección de Química Industrial la evaluación e implementación de la validación técnica producirá beneficios económicos, ambientales y facilitará la acreditación de los ensayos de galvanizado.

# 1. ANTECEDENTES

Dentro de la Ingeniería Química se han realizado validaciones de ensayos y métodos analíticos que aseguran la calidad; a continuación se presentan algunos de ellos:

- En 2008, Edgard Godínez y Ana Haeussler realizaron el proyecto titulado: Validación de la metodología analítica en el proceso de fabricación de una crema antimicótica y la cuantificación de clotrimazol como ingrediente activo.

El proyecto desarrolló la validación del proceso que permitió documentar y controlar que todas las operaciones de equipos, personal y procesos se mantuvieran dentro de las especificaciones que exigen las normas regulatorias y que llevan a tener productos de buena calidad. Así mismo, presentaron los resultados que obtuvieron del análisis del proceso y el método de cuantificación que confirmó que el producto cumplía con los requerimientos de linealidad, precisión, exactitud, especificidad, robustez, límites de detección y de cuantificación que lo hacen apto para su uso, además que se podía utilizar como guía para la validación de otros procesos químicos.

- En 2009, Nildred Montufar y Lorena Pineda ejecutaron el proyecto denominado: Validación de cinco métodos analíticos utilizados en el Laboratorio de Control de Calidad, de una planta de envasado de rones añejos.

El proyecto desarrolló la información teórica necesaria para validar la exactitud y precisión de métodos analíticos, utilizados para garantizar la calidad de los productos, en una empresa dedicada al envasado de rones añejos. De igual manera describieron la forma en la que se llevó a cabo la inducción al laboratorio y los cinco métodos que se validaron, posteriormente, se enumeran los métodos que fueron objeto de estudio y conforme el método la implementación de las réplicas y los resultados obtenidos. Los métodos que se validaron fueron: medición del color, destilación, medición del grado alcohólico, calibración de balanza y determinación de torque de apertura del producto. Dichos métodos cumplieron con los requisitos de linealidad, exactitud, precisión, especificidad, robustez, límite de detección y cuantificación.

- En 2010, Luis Castro y Jorge Estrada realizaron el proyecto denominado: Diagnóstico de la aplicación de un sistema de gestión de calidad a través de la Norma ISO/IEC 17025:2005 en el Laboratorio de Físicoquímica y validación del ensayo: Determinación de la constante de disociación ácida del rojo de metilo.

El proyecto tuvo lugar en el Laboratorio de Físicoquímica ubicado en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el cual cuenta con una sala equipada con reactivos, cristalería y aparatos adecuados a las actividades experimentales donde los alumnos debidamente organizados y acreditados participan en rondas de aplicación de conocimientos teórico-prácticos mediante el uso de herramientas matemáticas para interpretar la validez de los resultados. Dicho laboratorio se comprometió a mantener un sistema de gestión de calidad y competencia técnica durante la realización del ensayo Determinación de la constante de disociación ácida del rojo de metilo sobre la base de la

Norma ISO/IEC 17025:2005 en la cual tanto catedráticos, auxiliares y estudiantes la conozcan, implementen, se comprometan a cumplirla y a mejorar el desempeño continuamente. Entre los factores que determinaron la exactitud y confiabilidad del ensayo para su validación fueron: los factores humanos, las instalaciones y las condiciones ambientales; los métodos de ensayo y la validación de los métodos, los equipos, la trazabilidad de las mediciones, el muestreo y el manejo de los objetos a ensayar.

Por su parte, el presente trabajo realizó la validación de los ensayos de galvanizado, que se llevan a cabo en el Laboratorio de Química Industrial (USAC), con base en las Normas ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado), para artículos de hierro o acero y ASTM A239-89 Método de ensayo estándar para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre), y que por los antecedentes mencionados es el primer proyecto que propone la validación de un ensayo en el Laboratorio de Análisis Físicoquímico para dichos ensayos.



## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Validación**

Se puede interpretar la validación del método de ensayo como el proceso de definir un requisito y confirmar que el método de ensayo bajo consideración tiene capacidades de desempeño consistentes con lo que la aplicación requiere. Por consiguiente, como algo implícito, es necesario evaluar la capacidad de desempeño del método. El juicio de la conveniencia del método es importante; en el paso de la validación del método se tendió a concentrar en el proceso de evaluación de los parámetros de desempeño.

También, está implícito en el proceso de validación del método que los estudios para determinar los parámetros de desempeño son llevados a cabo utilizando equipos que están trabajando correctamente dentro de su especificación y adecuadamente calibrados. Igualmente el analista que lleva a cabo los estudios debe ser competente y tener conocimiento suficiente en el campo de trabajo, lo que le facilita poder tomar decisiones apropiadas a partir de las observaciones realizadas o de los progresos del estudio.

Según la Norma COGUANOR NGR/ISO/IEC 17025:2005 en su inciso 5.4.5 Validación de los métodos en el primer inciso de dicho punto establece: “La validación es la confirmación, a través del examen y el aporte de evidencia objetiva, de que se cumple los requisitos particulares para un uso específico previsto”. Asimismo en el inciso 5.4.5.2 menciona lo siguiente: “El laboratorio debe validar los métodos no normalizados, los métodos que diseña o desarrolla, los métodos normalizados empleados fuera del alcance previsto, así como las

ampliaciones y modificaciones de los métodos normalizados, para confirmar que los métodos son aptos para el uso previsto. La validación debe ser tan amplia como sea necesario para satisfacer las necesidades de la aplicación o del campo de aplicación dado. El laboratorio debe registrar los resultados obtenidos, el procedimiento utilizado para la validación y una declaración acerca de si el método es apto para el uso previsto”.

Así mismo, ya que la norma exige la validación de los ensayos para demostrar su competitividad técnica, el laboratorio tiene que decidir cuáles parámetros de desempeño del método necesitan caracterizarse para validar el método. La caracterización del desempeño del método es un proceso caro e inevitablemente puede ser acortado por el tiempo y consideraciones del costo.

Comenzar con una especificación cuidadosamente considerada proporciona una buena base sobre la cual planificar el proceso de validación, pero se reconoce que en la práctica esto no es siempre posible. El laboratorio debe hacerlo mejor que pueda dentro de la restricción impuesta, tomando en cuenta los requisitos del cliente, la experiencia existente del método y la necesidad de compatibilidad con otros métodos similares ya en uso dentro del laboratorio o utilizados por otros laboratorios.

Algunos de los parámetros pueden haberse determinado aproximadamente durante la fase de desarrollo del método. A menudo un conjunto particular de experimentos puede suministrar información sobre varios parámetros; de esta forma, el esfuerzo requerido para conseguir la información necesaria puede ser minimizado con una planificación.

La determinación del desempeño del método para su validación puede hacerse por:

- Calibración utilizando estándares de la muestra
- Comparación entre métodos
- Comparación con otros laboratorios
- Evaluación de la incertidumbre de los resultados

Cabe mencionar que la validación es un equilibrio entre costos, riesgos y posibilidades técnicas por lo que el laboratorio debe implementar métodos que estén al alcance de sus equipos, capacidades de sus analistas y de su gerencia.

#### **2.1.1. Parámetros para la validación de un ensayo**

Validar un método requiere la determinación de los siguientes parámetros:

- Exactitud: es la cercanía a un valor teórico de los resultados obtenidos. Se lleva a cabo utilizando un patrón de pureza conocida o comparando los resultados del método con aquellos de otro bien caracterizado, cuya exactitud esté definida.
- Precisión: es el grado de reproducibilidad de los resultados de la prueba obtenidos por el análisis de las muestras bajo una variedad de condiciones.

- Especificidad: es la habilidad de asegurar inequívocamente la presencia del analito y sus componentes, ya sea impurezas, productos de degradación y la matriz de componentes.
- El límite de detección: es la cantidad mínima de analito en una muestra que puede ser detectado, pero no necesariamente cuantificado bajo las condiciones experimentales.
- El límite de cuantificación: es la cantidad mínima de analito en una muestra que puede ser determinado con precisión aceptable y exactitud bajo condiciones experimentales estables.
- Linealidad: es la habilidad de obtener resultados directamente proporcionales a la concentración de analito en muestras dentro del rango dado.
- Robustez: es la medida de la capacidad para no ser afectado por pequeñas, pero deliberadas variaciones en los parámetros del método.

## **2.2. Oficina de Acreditación Guatemalteca – OGA-GEC-016**

La utilización de métodos de ensayo, adecuados para el propósito, permite obtener resultados trazables con un nivel apropiado de incertidumbre; dichos resultados comúnmente son usados como base para la toma de decisiones financieras, regulatorias, etc., relacionadas con el desarrollo y fabricación de productos, así como con la prestación de servicios y otras actividades de importancia en las economías nacionales, regionales e internacionales.

Los métodos de ensayo seleccionados, sean éstos normalizados, no normalizados o desarrollados por el laboratorio, deben estar adecuadamente validados y documentados, previo a su uso. Debe mencionarse que actualmente no existe una sola fuente o autoridad reconocida a nivel internacional respecto a la validación de métodos de ensayo; por lo anterior, aunque hay avances, aún no existe acuerdo unánime entre las diferentes disciplinas, respecto a la interpretación de algunos términos relacionados con el proceso de validación y a la aplicación de los mismos.

El propósito del documento es definir una política para la selección y validación de métodos de ensayo a ser aplicada por la OGA en la evaluación de los laboratorios que le soliciten su acreditación, en evaluaciones de seguimiento y reevaluaciones.

El reconocimiento formal de la competencia técnica de los laboratorios de ensayo es uno de los principales objetivos de la OGA, con el fin de que los resultados que estos organismos emitan sean aceptados a nivel nacional, regional e internacional.

Dada la situación internacional descrita, existen factores fuera del alcance de la OGA que influyen en el desarrollo y la revisión de su política de selección y validación de los métodos de ensayo. Los requisitos sobre la selección y validación de los métodos de ensayo, que deben cumplir los laboratorios, se exponen en el capítulo 5.4 Métodos de ensayo y calibración y validación de métodos, de la Norma COGUANOR NTG ISO/IEC 17025 Requisitos Generales para la Competencia de los Laboratorios de Ensayo y Calibración.

### **2.3. ASTM Internacional**

Creada en 1898, ASTM International es una de las mayores organizaciones en el mundo que desarrollan normas voluntarias por consenso. ASTM es una organización sin ánimo de lucro, que brinda un foro para el desarrollo y publicación de normas voluntarias por consenso, aplicables a los materiales, productos, sistemas y servicios. Los miembros de ASTM, que representan a productores, usuarios, consumidores, el gobierno y el mundo académico de más de 100 países, desarrollan documentos técnicos que son la base para la fabricación, gestión y adquisición, y para la elaboración de códigos y regulaciones. Estos miembros pertenecen a uno o más comités, cada uno de los cuales cubre un área temática, como por ejemplo acero, petróleo, dispositivos médicos, gestión de la propiedad, productos para el consumidor, y muchos más. Estos comités desarrollan más de las 11 000 normas ASTM que se pueden encontrar en el Annual Book of ASTM Standards, de 77 volúmenes.

Como se usa en ASTM, una norma es un documento que ha sido desarrollado y establecido dentro de los principios de consenso de la organización, y que cumple los requisitos de los procedimientos y regulaciones de ASTM. Las normas elaboradas por consenso se elaboran con la participación de todas las partes que tienen intereses en el desarrollo o uso de las normas.

Las normas ASTM las usan individuos, compañías y agencias en todo el mundo. Los compradores y vendedores incorporan normas en sus contratos; los científicos e ingenieros las usan en sus laboratorios y oficinas; los arquitectos y diseñadores las usan en sus planos; las agencias gubernamentales de todo el mundo hacen referencia a ellas en códigos,

regulaciones y leyes; y muchos otros las consultan para obtener orientación sobre muchos temas.

Las normas ASTM son voluntarias en el sentido de que ASTM no exige observarlas. Sin embargo, las autoridades gubernamentales con facultad normativa con frecuencia dan fuerza de ley a las normas voluntarias, mediante su cita en leyes, regulaciones y códigos. En los Estados Unidos, la relación entre los normalizadores del sector privado y el sector público se ha fortalecido con la promulgación, en 1995, de la Ley Nacional sobre Transferencia y Avance Tecnológico (Ley Pública 104-113). La ley exige a las agencias gubernamentales el uso de normas desarrolladas en forma privada, siempre que sea posible, ahorrando de esta manera millones de dólares a los contribuyentes, al evitar la duplicación de esfuerzos de normalización.

#### **2.4. Laboratorio de la Sección de Química Industrial**

El Laboratorio de Físicoquímica de la Sección de Química Industrial pertenece al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La Sección de Química Industrial se encuentra en el primer nivel del Edificio T-5, ciudad Universitaria, zona 12 de la ciudad de Guatemala. El laboratorio de la Sección de Química Industrial realiza una serie de ensayos de control de calidad, tanto a materia prima como a productos terminados. El generar mayor confianza con los clientes y mejorar el trato hacia los mismos ayudará a que las actividades de servicio realizadas por la USAC tengan un mayor alcance.

En cada ensayo acreditado el personal encargado debe aplicar de forma ordenada, los requisitos establecidos por la norma; desde los implementos de seguridad como guantes, lentes, bata, etc., hasta el equipo y la cristalería

adecuada para cada prueba. Cada ensayo cuenta con su proceso de realización de manera ordenada y clara en el Manual de Calidad, el cual es aprobado y verificado por la Dirección.

El análisis y la interpretación objetiva de los resultados experimentales, que se deben de realizar le permiten al personal encargado escribir informes técnicos y extraer conclusiones, que son verificados y aprobados posteriormente.

## **2.5. Corrosión**

La corrosión es un ataque químico gradual a un metal, por su medio ambiente, que da resultado la conversión del metal en un óxido, una sal o algún otro compuesto.

### **2.5.1. Definición y alcance**

Los metales que han experimentado corrosión pierden su resistencia, su ductilidad y otras propiedades mecánicas y físicas convenientes. El ataque corrosivo se produce frecuentemente en combinación con otros mecanismos de fallas, tales como la fatiga, la erosión y el esfuerzo. Hay muchos tipos de medios corrosivos, tales como el aire, las atmósferas industriales, el suelo, los ácidos, las bases y las soluciones salinas. Con frecuencia, se produce una corrosión a elevadas temperaturas, en medios que, a bajas temperaturas, son por lo común inertes.

### **2.5.2. Mecanismos básicos de la corrosión**

La corrosión es el medio químico por el que se deterioran y destruyen los metales y se han reconocido dos mecanismos básicos: el ataque químico directo y el ataque electroquímico, que puede subdividirse en cierto número de formas diferentes de corrosión. Por lo común, se encuentran implicadas una o más reacciones químicas, sea cual fuere el mecanismo básico por el que se efectúa el ataque.

“El ataque químico directo incluye todos los tipos de corrosión en los que no hay un flujo apreciable de corriente a través del metal, en distancias apreciables. Por supuesto, los electrones abandonan los átomos de un metal, cuando éstos se convierten en cationes metálicos de un compuesto; sin embargo, no hay un flujo de electrones por el metal a escala macroscópica, y no hay zonas macroscópicas claras del ánodo y cátodo.”<sup>1</sup>

El ataque químico directo da como resultado una reacción uniforme sobre toda la superficie expuesta. Por lo común se produce en el material metálico una capa escamosa o un depósito de espesor uniforme. Aunque dicho depósito se adhiere frecuentemente muy bien, son también comunes las capas depositadas que no se adhieren. El espesor de las películas adheridas aumenta, aproximadamente, en proporción directa a la raíz cuadrada del tiempo. Esta expresión justifica el uso del término de Ley Parabólica, en relación con el engrosamiento de las capas de productos de corrosión.

De manera sorprendente, los depósitos aumentan por movimientos del metal, a través de la película, hasta el corrosivo, así como también mediante la difusión del corrosivo a través de la película, hasta el metal. Asimismo, se han

---

<sup>1</sup> ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. p. 50.

observado casos de movimientos contrarios, tanto del metal como del corrosivo. El mecanismo básico preferido depende del tipo de metal y las condiciones de corrosión, sobre todo la temperatura.

Un ejemplo de ataque corrosivo directo es la oxidación del hierro y el acero o la oxidación a temperaturas elevadas de esos dos materiales metálicos. Otro ejemplo de ataque químico directo es la corrosión de los recubrimientos de cobre por la atmósfera. Las atmósferas industriales que contienen oxígeno, humedad y óxidos de azufre (de productos de combustión), reaccionan para formar sulfato de cobre, una cubierta verdosa e insoluble. La pérdida de lustre en los objetos de plata es otro ejemplo más de ataque químico directo. En los ejemplos citados, el ataque se lleva a cabo uniformemente sobre toda la superficie expuesta del material metálico.

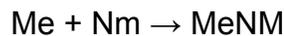
El ataque electroquímico es el segundo mecanismo principal de la corrosión y se caracteriza por el establecimiento de zonas catódicas y anódicas, separadas por distancias finitas y entre las que fluyen electrones, a través del metal. En el corrosivo electrolítico, la electricidad fluye por medio del movimiento de los iones, de modo que el ataque es localizado, más que uniforme, como es el caso en el ataque químico directo. Se presentan celdas galvánicas o de concentración, dependiendo de las circunstancias de la corrosión. A veces, existen simultáneamente ambos tipos de celdas. La corrosión de celda de concentración se subdivide, además, en celdas de concentración de iones metálicos y celdas de concentración de oxígeno.

### **2.5.3. Reacciones químicas de la corrosión**

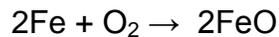
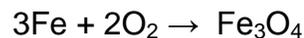
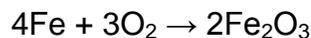
Es conveniente presentar muchas variedades comunes de corrosión por medio de una o más de varias reacciones químicas generales. A continuación

se presentan unas cuantas reacciones típicas, relacionándolas con los procesos reales de corrosión.

En condiciones favorables, los metales se combinan directamente con materiales no metálicos. Esto puede representarse por medio de:

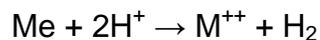


“En donde Me es un elemento metálico apropiado y Nm un material no metálico. La oxidación a elevadas temperaturas del hierro en aire seco es un buen ejemplo de este tipo de corrosión. En el hierro pueden formarse tres capas distintas de óxido:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , la más externa,  $\text{FeO}$ , la más interna, y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  como capa intermedia.”<sup>2</sup> Las reacciones verdaderas pueden expresarse como:



En esta forma, la oxidación del hierro es una forma de ataque químico directo.

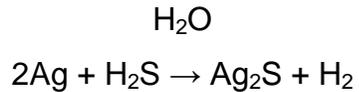
A veces, los metales desplazan al hidrógeno de los ácidos a las soluciones ácidas:



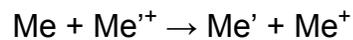
La liberación de hidrógeno, cuando reacciona el ácido sulfúrico con cinc, es un buen ejemplo de este tipo de reacción. La pérdida de lustre de la plata por el sulfuro de hidrógeno en presencia de la humedad puede considerarse como otro ejemplo:

---

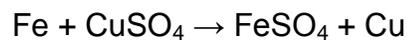
<sup>2</sup> KEYSER, Carl. Ciencia de materiales para ingeniería. p. 75.



Esos dos ejemplos se clasifican como ataques químicos directos. Los metales más activos tienden a desplazar a los iones menos activos de sus soluciones:



El hierro sumergido en una solución de sulfato de cobre, desplazará a este último metal. El cobre se precipita como una película sobre el hierro, mientras que este último entra en solución:



Si pudiera cubrirse el hierro con una cubierta adherente y continua de cobre la reacción cesaría. En realidad, la cubierta carece de continuidad y, por lo tanto, se forman zonas anódicas y catódicas locales, y lo que se inició como ataque químico directo concluye como ataque electroquímico más complejo. Si se desarrollan zonas anódicas y catódicas, la reacción puede escribirse en la forma de reacciones separadas del ánodo y el cátodo. En el ánodo:



Y en el cátodo:

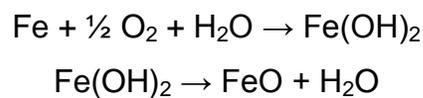


“En donde se representa a un electrón. Los electrones fluyen del ánodo al cátodo a través del metal, y los iones conducen electricidad a través del electrólito, del ánodo al cátodo, para completar el circuito. Este tipo de reacción está implicado, a veces, en una forma de ataque electroquímico que se conoce como picadura.”<sup>3</sup>

La combinación del metal con el oxígeno del aire, cuando hay humedad presente, es una reacción muy importante, que puede representarse en la forma siguiente:



Esta es la reacción involucrada en el ataque directo al hierro por el aire húmedo, para producir herrumbre. El hierro no produce herrumbre en aire seco a una temperatura cercana a los 70°F (20°C). En el aire húmedo, los hidróxidos de hierro formados se descomponen habitualmente para formar el óxido correspondiente, más agua:



El ataque de los metales por agua que contiene cantidades pequeñas de electrólitos disueltos y oxígeno, puede representarse como:



---

<sup>3</sup> ASKELAND, Donald. Ciencia e ingeniería de los materiales. p. 56.

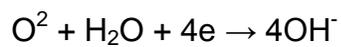
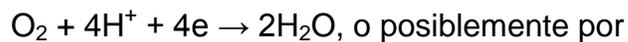
“El oxígeno presente en el agua se combina con el hidrógeno liberado. Esta reacción se produce, con frecuencia, como dos reacciones separadas en el ánodo y el cátodo.”<sup>4</sup> En el ánodo:



Mientras que en el cátodo puede liberarse hidrógeno:



O puede reducirse el oxígeno:



Estas son reacciones clásicas para el picado del acero. Las picaduras se convierten en zonas anódicas, en las que se produce la reacción anódica, mientras que el resto de la superficie es catódica.

#### **2.5.4. Ataque electroquímico: celdas galvánicas**

Cuando se conectan eléctricamente dos metales distintos y se sumergen en una solución electrolítica, se forma una celda galvánica. El metal que tenga el potencial de electrodo algebraicamente mayor tiende a sufrir un ataque y se convierte en el ánodo. Cuando este último se disuelve, se deposita en el cátodo una cantidad electroquímicamente equivalente de hidrógeno o del elemento metálico de menor potencial de electrodo, se deposita en el cátodo. En esa forma, el ánodo se disuelve y el cátodo queda protegido.

---

<sup>4</sup> KEYSER, Carl. Ciencia de materiales para ingeniería. p. 85.

Cuando se disuelve el ánodo, para formar iones, se liberan electrones, que fluyen por cualquier conexión eléctrica presente, y llegan al cátodo. Allí, neutralizan las cargas positivas de los iones que salen de la solución. Inicialmente, esa celda producirá cierto voltaje, dependiendo de los metales que se seleccionen como electrodos, el tipo y la concentración del electrólito y la temperatura de la celda. El voltaje disminuirá muy pronto y la rapidez del ataque se hará menor, debido a la polarización, que se produce a causa del vaciado de iones del electrólito en la región del cátodo, y por la excesiva concentración de iones en la zona del ánodo. Si la celda es de tal índole que se descargue hidrógeno en el cátodo y se libere oxígeno en el ánodo, el voltaje de la celda se reducirá todavía más, puesto que los electrodos quedarán recubiertos por burbujas gaseosas. El efecto neto es una disminución de la actividad de la celda, en comparación con la que tenía inicialmente, cuando las dos superficies electródicas limpias se sumergieron en el electrólito.

La rapidez del ataque galvánico depende del área del cátodo en relación a la del ánodo y varía en forma directamente proporcional a la razón del área del cátodo a la del ánodo. Un área anódica relativamente pequeña será atacada con mucha mayor rapidez que si es grande. En el acero no protegido de los cascos de los barcos se produce una corrosión galvánica. El acero es anódico con respecto al latón de los tornillos y remaches y, por lo tanto, el casco sufre un ataque selectivo. El casco es inerte en las zonas protegidas por pintura o recubrimientos plásticos; pero las grietas pequeñas en la capa de recubrimiento dejan expuestas superficies anódicas relativamente pequeñas. En esas regiones, el ataque es muy rápido, a menos que se tomen medidas preventivas.

Los efectos del área explican el rápido ataque que se produce cuando se utilizan remaches de acero para fijar miembros de cobre, mientras que el

empleo de remaches de cobre para fijar miembros de acero produce una corrosión insignificante.

### **2.5.5. Formas específicas de corrosión**

A continuación se describirán ciertas formas de corrosión que en su mayoría afectan directamente a una muestra de lámina galvanizada al permitírsele entrar en contacto con el ambiente.

#### **2.5.5.1. Picadura**

Es la forma localizada de corrosión que da como resultado pequeños orificios que pueden traspasar completamente a ciertos miembros. Se encuentra en el aluminio y sus aleaciones, el cobre y las suyas el acero inoxidable y las aleaciones de alto contenido de níquel. La picadura es una forma electroquímica de ataque, en la que el mecanismo básico implica la intervención de celdas galvánicas o de concentración y, a veces, de ambos tipos.

Las celdas galvánicas se originan por las diferencias de composiciones locales que existen en las superficies metálicas. En los metales comercialmente puros, las cantidades pequeñas de impurezas, que tienen un potencial diferente de solución, producen corrosión. Una impureza localizada de mayor actividad, o sea más anódica que el metal básico, es mucho más grave que una impureza relativamente inactiva, debido al efecto de las áreas relativas del ánodo y el cátodo. Las celdas galvánicas tienen probabilidades de originarse en la superficie de un pedazo de metal, cuando se rompe una capa de recubrimiento pasivo por medios mecánicos. La zona que queda expuesta es anódica, y por su área relativamente pequeña, se corroe con rapidez. La presencia de

suciedad o materias extrañas que se adhieren a la superficie del metal puede excluir al oxígeno e impedir la formación de una película pasiva. Cuando se retira la suciedad o se cae de la superficie, queda expuesta una pequeña área, y el ataque se produce con rapidez.

Las celdas de concentración causan también picaduras. Existe una tendencia a que la concentración de oxígeno sea menor en la parte del fondo de las imperfecciones superficiales. Así, el ataque de la celda de concentración puede iniciarse por medio de raspaduras o defectos similares en la superficie metálica. La falta de oxígeno puede impedir la formación de una película pasiva protectora, y la picadura se hace cada vez mayor y más profunda. La concentración de iones metálicos puede elevarse lo suficiente en el fondo de la picadura, para producir otra celda que se oponga a la de concentración de oxígeno. En esa forma, es posible que se alcance un equilibrio en cierto punto, y cesa la penetración de la picadura. Las celdas de concentración de oxígeno se producen también por suciedad adherida con poca fuerza, hendiduras asociadas con juntas de superposición y soldaduras de puntos, o por malas técnicas de diseño o fabricación.

#### **2.5.5.2. Ataque intergranular**

Se produce cuando los límites granulares de un metal se corroen selectivamente. La causa es probablemente la acción galvánica, resultante de las diferencias de composición existentes entre los límites granulares y los granos mismos. Pueden observarse ataques intergranulares en algunos aceros inoxidables de cromo y níquel, que han sido soldados o tratados térmicamente de manera inadecuada. También reciben ataques intergranulares las aleaciones con base de cobre, tales como latones. El desarrollo de fisuras intergranulares

se estimula debido a celdas de concentración de oxígeno y el área anódica relativamente pequeña.

#### **2.5.5.3. Descincado**

Es una forma de corrosión, peculiar en las aleaciones de cinc y cobre; o sea, latón. Como lo indica su nombre, el descincado da como resultado una pérdida de cinc del latón, dejando atrás una masa porosa de cobre. No existe un acuerdo respecto a cómo se produce este fenómeno; pero es probable que se encuentre asociado a celdas galvánicas submicroscópicas, que pudieran formarse debido a diferencias de concentración muy localizadas, acompañadas de variaciones en el potencial de solución. El descincado ocurre en dos formas, la primera de tipo de intrusión y la segunda de ataque uniforme. El descincado de tipo intrusivo se debe, probablemente, al retiro local de películas pasivas. El ataque se inicia sobre una pequeña porción de la superficie y se introduce en el metal. El descincado uniforme es una forma de ataque general, más localizado.

#### **2.5.5.4. Corrosión-erosión**

Es una combinación de erosión mecánica con uno de los mecanismos básicos de la corrosión. Los metales que resisten a la corrosión, debido a la formación de capas pasivas, pierden su estabilidad si la erosión impide que se mantenga una película protectora. La erosión se debe al flujo turbulento de líquidos, sobre todo los que contienen sólidos en suspensión; buenos ejemplos son la suciedad y las sales que se precipitan cuando se enfrían soluciones saturadas en caliente. La turbulencia, a su vez, se debe a las altas velocidades de flujo, los cambios en el diámetro de los tubos, los codos y los accesorios.

El fenómeno denominado ahuecamiento está estrechamente asociado al flujo turbulento. Cuando existe un movimiento relativo de una gran velocidad

entre el agua y una superficie, se forman burbujas de vapor, que se rompen en la superficie. La presión en las burbujas es muy baja y ellas mismas son inestables. Se produce un colapso repentino y se ejerce una acción de golpeo que tiende a eliminar metal, así como también las películas de protección. Si el ahuecamiento se combina con la corrosión, los dos mecanismos se complementan el uno con el otro. En este caso, el ahuecamiento elimina las capas pasivas y se produce, a continuación, un proceso corrosivo. Esto hace que la superficie se vuelva irregular, lo cual fomenta más ahuecamientos, de tal modo que no puede formarse de nuevo una película pasiva estable. Los metales y las aleaciones que tienen una resistencia excelente a la corrosión en líquidos en reposo, a veces se destruyen por corrosión-erosión o ahuecamiento en cuestión de pocas semanas, en esos mismos líquidos, cuando se desplazan a altas velocidades.

## **2.6. Galvanizado**

Galvanizado es el proceso electroquímico por el cual se puede cubrir un metal con otro. Se denomina galvanización pues este proceso se desarrolló a partir del trabajo de Luigi Galvani, quien descubrió en sus experimentos que si se pone en contacto un metal con una pata cercenada a una rana, ésta se contrae como si estuviese viva, luego descubrió que cada metal presentaba un grado diferente de reacción en la pata de rana, por lo tanto cada metal tiene una carga eléctrica diferente, según el tipo de metal lo cual se debe a que se han descubierto metales con mucha carga eléctrica por el magnetismo de la tierra. Más tarde ordenó los metales según su carga y descubrió que puede recubrirse un metal con otro, aprovechando esta cualidad (siempre depositando un metal de carga mayor sobre otro de carga menor). El galvanizado presenta una serie de ventajas que no es posible encontrar en otros tipos de recubrimientos.

- Bajo costo versus vida útil
- Bajo nivel de corrosión
- Recubrimiento adherido metalúrgicamente al acero
- Fácil de inspecciona
- Gran resistencia a daños mecánicos

### **2.6.1. Tipos de baños galvánicos**

El galvanizado es uno de los métodos que se utilizan para mejorar la resistencia a la corrosión del acero (y de las aleaciones de hierro) mediante un pequeño recubrimiento sobre la superficie. El galvanizado permite el recubrimiento de piezas de acero o de hierro fundido mediante su inmersión en un baño de cinc fundido.

En función de las características que deba presentar la protección anticorrosiva, se aplican diferentes técnicas de protección a base de cinc:

Galvanizado por inmersión en caliente. Las piezas a tratar se sumergen, habiendo limpiado previamente su superficie, en un baño de cinc fundido que suele estar a una temperatura de 445°C a 460°C. El cinc reacciona con el hierro, o el acero, formando capas de aleación sobre la superficie. La capa más externa suele ser cinc dúctil no aleado. El cinc se une metalúrgicamente al metal base para formar un recubrimiento protector que posee una excelente resistencia a la corrosión.

Galvanizado en frío. El galvanizado en frío es un recubrimiento de zinc que se aplica sobre acero mediante pistola, brocha o rodillo. Para que este tipo de producto tenga una resistencia a la corrosión equivalente al galvanizado en caliente se requiere que la película seca contenga un mínimo de 95% de zinc.

Además es necesario que la capa sea conductora eléctricamente, solamente con estas 2 características es capaz de proteger al acero galvánicamente (protección catódica). Por lo anterior este tipo de productos deben cumplir con varias normas ASTM. Las pinturas ricas en zinc no cumplen con estas normas y no pueden ser consideradas para protección galvánica.

Galvanizado o cincado electrolítico. Esta técnica consiste en depositar sobre la pieza una capa de cinc mediante corriente continua a partir de una solución salina que contiene cinc. El proceso se utiliza para proteger piezas más pequeñas, cuando requieren un acabado más uniforme que proporciona el galvanizado.

Sherardización. Las piezas preparadas de hierro o acero se calientan con una mezcla de polvo de cinc y arena en tambores rotatorios a temperatura por debajo del punto de fusión del cinc (380°C -400°C), hasta que éste forma un recubrimiento cerrado sobre la superficie de la pieza. El recubrimiento es muy uniforme. “El proceso, que da a las piezas un recubrimiento mate gris, se utiliza principalmente para piezas pequeñas, debido a la dificultad de calentamiento de grandes piezas de forma uniforme.”<sup>5</sup>

Recubrimientos con polvo de cinc. En esta clase de recubrimiento se emplea un polvo de cinc muy fino que se halla en suspensión en un aglutinante orgánico o inorgánico. Las técnicas de aplicación de este tipo de revestimientos son similares a las empleadas para la aplicación de laca (p. ej. proyección, inmersión). Las capas de polvo de cinc presentan una conductividad limitada, ya que el cinc no se encuentra por toda la superficie en contacto con el material base y tampoco forma en las zonas limítrofes aleaciones de cinc-hierro.

---

<sup>5</sup> KEYSER, Carl. Ciencia de los materiales para ingeniería. p. 90.

Protección anticorrosiva catódica. Un metal en estado de corrosión se disuelve anódicamente. En la protección anticorrosiva catódica se impide la corrosión haciendo del metal a proteger un cátodo. Esto se consigue disponiendo un elemento de cortocircuito compuesto del material de la pieza a proteger y de una aleación metálica menos noble; estos dos materiales presentan una conexión conductora metálica. Al sumergir la pareja de materiales en un electrolito (p. ej. agua de mar), se disuelve el metal menor noble, disociándose en iones y electrones. Los iones pasan al electrolito, mientras que los electrones pasan a través de la conexión metálica a la superficie del metal más noble. La protección anticorrosiva catódica se utiliza, por ejemplo, como protección exterior de la parte sumergida de barcos, pasarelas, muelles, rompeolas, estacas, puertas de esclusas, boyas y equipos submarinos para, por ejemplo, la extracción de petróleo y gas natural.

### 3. DISEÑO METODOLÓGICO

#### 3.1. Variables

A continuación se muestran las variables que intervinieron en el análisis de los ensayos de galvanizado para las Normas ASTM A90-81 y ASTM A239-89 según las características que se mencionan.

Tabla I. **Definición operacional de las variables para la validación de los ensayos de galvanizado**

Variable	Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable	Respuesta
Peso	X		X		X
Longitud	X		X		X
Espesor		X	X		X
Cobertura	X		X		X
Número de Inmersiones	X		X		X

Fuente: elaboración propia

### **3.2. Delimitación del campo de estudio**

Campo: análisis químico

Área: gravimetría

Línea: gestión total de la calidad, métodos analíticos de galvanizado.

Proyecto: evaluar e implementar la validación técnica de los ensayos de galvanizado, según las Normas ASTM A90-81 y ASTM A239-89.

Ubicación: Laboratorio de Análisis Físicoquímico –LAFIQ-, sección de Química Industrial del Centro de Investigaciones de Ingeniería, Usac. Primer nivel del edificio T-3, ciudad universitaria, zona 12 Guatemala.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

- Investigador: Br. Edwin Roberto Cancinos Castillo
- Asesor: Ing. César Adolfo García Guerra
- Coasesor: Ing. Adrián Soberanis

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

A continuación se presentan todos aquellos recursos que se utilizaron en la realización del análisis de los ensayos; los reactivos y muestras han sido proporcionados por el laboratorio.

#### **3.4.1. Reactivos y muestras**

- Muestras de hoja galvanizada
- Alcohol isopropílico, grado industrial
- Sulfato de cobre pentahidratado, grado reactivo
- Ácido clorhídrico, grado reactivo

### **3.4.2. Equipo y cristalería**

- Computadora marca DELL, Intel Pentium Inside, Windows 7
- Impresora marca CANON MP250
- Beakers 1000 mL,  $\pm 5$  mL
- Balones aforados 1000 mL,  $\pm 5$  mL
- Pizetas
- Balanza marca OHAUS, Modelo Adventurer, No. Serie G1231202040133, incertidumbre  $\pm 0.001$  gramo.
- Plancha marca Fischer Scientific, Modelo Isotemp.
- Vernier marca Mitutoyo, incertidumbre  $\pm 0.01$  milímetro.

### **3.5. Técnica cuantitativa**

- Norma A239-89 Método de ensayo estándar para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre).
- Norma A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado) para artículos de hierro o acero.

### **3.6. Recolección y ordenamiento de la información**

La información se recolectó y ordenó a través de:

- Documentación previa y posterior a la implementación de la validación técnica.
- Hojas de registros del laboratorio de la sección de Química Industrial.

- Fotografías previas y posteriores a la implementación de la validación técnica.

### **3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

A continuación las pautas definidas para la tabulación, el ordenamiento y el procesamiento de la información de los ensayos de galvanizado bajo las Normas ASTM A90-81 y A239-89.

#### **3.7.1. Análisis de muestra bajo la Norma ASTM A90-81**

Se presenta el procedimiento general definido por las Normas ASTM así como el análisis para el manejo experimental, la preparación de las muestras, el manejo de los productos y desechos, y los resultados esperados.

##### **3.7.1.1. Manejo experimental**

Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo combinatorio, en el cual se aplicó un experimento factorial evaluando 1 método de decapado a partir de 1 agente decapante (ácido clorhídrico 500 ml y 500 ml del reactivo agua) realizando muestras por triplicado para ocho laboratoristas en la intercomparación de resultados. Resultando 1 unidad experimental y un total de 24 tratamientos.

##### **3.7.1.2. Preparación de la muestra**

Las muestras seleccionadas para el ensayo estaban libres de abrasión o cortes en el recubrimiento de zinc. Fueron limpiadas con un disolvente nafta u otro disolvente adecuado a fondo, luego se enjuagó con alcohol isopropílico y

se secó. Previamente se dejaron por 24 horas en la desecadora para evitar variaciones por humedad.

### **3.7.1.3. Procedimiento**

Este método cubre procedimientos para la determinación del peso del recubrimiento de zinc-recubierto (galvanizado) de hojas y otros artículos recubiertos de zinc. El despojado de la capa de zinc de las muestras se realizó utilizando la solución de ácido clorhídrico (1+1) (Método Estándar Alternativo). Se inició pesando las muestras de forma individual con una precisión de 0,01 gramos. Después de pesar, se sumergió cada muestra por separado en la solución de extracción y se mantuvo hasta que la violenta evolución del hidrógeno cesó, y sólo unas pocas burbujas se desarrollen. Esto requirió de 15 a 30 segundos. La misma solución se puede utilizar varias veces hasta que el tiempo requerido para la extracción se hace inconvenientemente largo. La temperatura de la solución de extracción no fue superior en ningún momento a 38°C (100°F). Después del despojado, se lavaron las muestras con agua corriente y luego se secaron. Finalmente, se pesaron las muestras de nuevo, a la misma precisión mencionada.

### **3.7.1.4. Manejo de productos y residuos**

Al finalizar el proceso de decapado se determinó el área de la hoja (una superficie) con una precisión de 0,01 plg<sup>2</sup> o 5 mm<sup>2</sup>., cuando no sea posible determinar con precisión la zona, como en muestras de hojas onduladas, el espesor de la lámina se determinará con precisión de 0.001 plg o 0.01 mm. Esto para determinar posteriormente el peso de la muestra y determinar la cantidad de recubrimiento decapado. Sin embargo, la precisión en el cálculo del área se determinó por medio de la relación peso/área.

En el caso particular de la solución de ácido clorhídrico se neutralizó con una base fuerte.

#### **3.7.1.5. Resultados esperados**

Al concluir la parte experimental, se obtuvo una muestra libre de galvanizado con el fin de poder determinar la calidad y cantidad de cinc que se encontraba en la muestra. Así mismo, se determinó por medio de la intercomparación de resultados la precisión del método y la capacidad de realizarlo por cualquier personal capacitado para el ensayo.

#### **3.7.2. Análisis de muestras bajo la Norma ASTM A239-89**

Se presenta el procedimiento general definido por las Normas ASTM así como el análisis para el manejo experimental, la preparación de las muestras, el manejo de los productos y desechos, y los resultados esperados.

##### **3.7.2.1. Manejo experimental**

Se utilizó un diseño completamente al azar con un arreglo combinatorio, en el cual se aplicó un experimento factorial evaluando 1 método de decapado a partir de 1 agente decapante (36 gramos sulfato de cobre pentahidratado en 100 gramos de reactivo agua) realizando muestras por triplicado para ocho laboratoristas. Resultando 1 unidad experimental y un total de 24 tratamientos.

### **3.7.2.2. Preparación de muestra**

Las muestras seleccionadas para el ensayo estaban libres de abrasión o cortes en el recubrimiento de cinc. Fueron limpiadas con un disolvente orgánico volátil como una mezcla de 70% cloroetano 30% xilol y finalmente, se lavó con agua limpia y se secó con un trapo de algodón limpio. Previamente se dejaron las muestras 24 horas en la desecadora para evitar variaciones por humedad.

### **3.7.2.3. Procedimiento**

Este método de ensayo, conocido como la prueba de Preece, cubre el procedimiento para determinar, mediante el uso de una solución de sulfato de cobre, el lugar más delgado en un recubrimiento de zinc para artículos de hierro o acero. Se inició sumergiendo las muestras en la solución de sulfato de cobre, que se mantuvo a una temperatura de 16 a 20°C (61 a 68°F). Las muestras permanecieron en una posición fija en la solución exactamente 1 minuto. Si se especifica un baño de medio minuto, este se le concederá a las muestras después de la finalización de los baños de un minuto. No se debe agitar la solución durante el periodo de inmersión, ni permita que las muestras se toquen entre sí o a los lados del recipiente. Después de cada baño, se lavaron las muestras inmediatamente en el agua de enjuague, y se utilizó un cepillo de cerdas de fibra para eliminar cualquier depósito de cobre que se haya formado en la capa de zinc. Luego se lavó y limpió las muestras, hasta que se haya superado el número requerido de baños o hasta que el punto final se haya alcanzado.

#### **3.7.2.4. Manejo de productos y residuos**

El punto final fue reconocido por la aparición de brillo, depósitos adheridos de cobre. Sin embargo, si tal depósito no se forma después de la desaparición completa de la capa de zinc, el baño que suceda a la desaparición del zinc se reconocerá como el punto final. Al contar el número de inmersiones para una capa resistente, el último baño el cual define el punto final no se incluye. En el caso particular de la solución de sulfato de cobre, a este se le evaporó el agua y de esta manera se recuperó el sulfato de cobre en cristales.

#### **3.7.2.5. Resultados esperados**

Al concluir la parte experimental, se observó de manera eficiente el punto final de la reacción y se determinó la cantidad de baños que puede soportar. Así mismo, por medio de la intercomparación de resultados, se determinó si el método es preciso.

#### **3.7.3. Determinación de la linealidad**

La linealidad del método se determinó por medio de la gráfica de espesor versus cobertura, se graficó por medio de 3 grupos: practicantes, laboratoristas y expertos. Su coeficiente de correlación está entre 0,95 y 1. Si se cumplen estas condiciones, entonces el método es lineal.

#### **3.7.4. Determinación de la exactitud**

La exactitud se determinó utilizando los errores relativos, de la intercomparación de los resultados, de las muestras proporcionadas por el Laboratorio de la Sección de Química Industrial. Si el error promedio de las intercomparaciones es menor al 5%, el método es exacto.

#### **3.7.5. Determinación de la precisión**

Se utilizaron muestras de hoja de galvanizado proporcionadas por el Laboratorio, siendo comparadas entre sí por medio de un análisis de varianza, prueba F, prueba de Tukey y Diagrama de Schewart. Su desviación promedio no fue mayor al 5%. Si cumple con esto, el método es preciso.

#### **3.7.6. Determinación de la especificidad**

Se recurrió a la especificidad proporcionada por las normas ASTM A90-81 Y A239-89. Ya que por ser una norma internacional y validada, la especificidad del método queda a criterio de la Norma ya que es una norma específicamente para lámina galvanizada, y en el Laboratorio de la Sección de Química Industrial es una norma exclusiva para uso de lámina galvanizada.

#### **3.7.7. Determinación de los límites de cuantificación, detección y repetitividad**

La determinación de estos límites se realizó por medio de las ecuaciones siguientes:

- Límite de detección:

$$LD = 3\sigma$$

- Límite de cuantificación:

$$LC = 10\sigma$$

- Límite de repetitividad:

$$LR = 2.8 \sigma$$

### **3.7.8. Determinación de la robustez**

La robustez hace referencia a la estabilidad del método, por lo que se evaluó repitiendo los pasos anteriores bajo las mismas circunstancias durante un período de 15 días, si la desviación de los resultados es menor al 5%, entonces el método es robusto.

Los criterios de aceptación para cada parámetro a evaluar han sido determinados por el Laboratorio de Análisis Físicoquímico debido a que las Normas ASTM no lo especifican. Según la OGA en su norma OGA-GEC-016 en su numeral 4.2 Validación de los Métodos de Ensayo para el Caso 1 Método Normalizado permite definir un procedimiento para calcular y evaluar los parámetros de desempeño que se consideren necesarios para asegurar la confiabilidad del método. Así mismo en su numeral 2 Evaluación de los parámetros de desempeño del Método sugiera para la Exactitud y Precisión un error máximo de 10% y para la Linealidad un error máximo de 5%. Esto coincide así mismo con la Norma 17025:2005 que indica en su numeral 5.4.5.3 que los parámetros deben ser establecidos según las necesidades del cliente; siendo el Laboratorio acreditado obligado a una mejora continua.

### 3.7.9. Programas utilizados para el análisis estadístico

- Microsoft Office Excel 2003. Parte de Microsoft Office Professional Edition 2003. Copyright 1985-2003 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- Infostat Versión Estudiantil. *Software* Estadístico. Universidad Nacional de Córdoba (FCA-UNC).

### 3.8. Análisis estadístico

Los ensayos fueron sometidos a pruebas estadísticas de validación, como lo son el análisis de varianza, la prueba Tukey, la prueba DMS y la prueba Fisher; para verificar que cumplan los parámetros mencionados.

Tabla II. Análisis de varianza

Fuente de variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados medios	f calculada
Tratamientos	SSA	k-1	$S_1^2 = SSA/k-1$	$S_1^2/S^2$
Error	SSE	k(n-1)	$S^2 = SSE/[k(n-1)]$	
Total	SST	nk-1		

Fuente: MILLER, J.C. *Estadística para química analítica*. p. 75.

Donde:

SST = se calcula de la siguiente forma

$$\sum Y^2 - Y_t / n = SST$$

SSA = se calcula de la siguiente forma

$$\sum Y^2 / k - Y_t / n = SSA$$

SSE = se calcula de la siguiente forma

$$SST - SSA = SSE$$

## **4. RESULTADOS**

### **4.1. Diagnóstico inicial de las condiciones, recursos, materiales metrológicos, legales y de gestión del Laboratorio de la sección de Química Industrial**

El Laboratorio de Fisicoquímica de la Sección de Química Industrial pertenece al Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. La Sección de Química Industrial se encuentra en el primer nivel del Edificio T-5, ciudad Universitaria, zona 12 de la ciudad de Guatemala.

El laboratorio realiza una serie de ensayos de control de calidad, tanto a materia prima como a productos terminados. En cada ensayo acreditado el personal encargado debe aplicar de forma ordenada, los requisitos establecidos por la norma; desde los implementos de seguridad como guantes, lentes, bata, etc., hasta el equipo y la cristalería adecuada para cada prueba. Cada ensayo cuenta con su proceso de realización de manera ordenada y clara en el Manual de Calidad, el cual es aprobado y verificado por la Dirección.

El Laboratorio se encuentra debidamente equipado, por lo que para los ensayos de galvanizado se cuenta con una balanza calibrada, reactivos adecuados, un vernier calibrado y cristalería certificada. El análisis y la interpretación objetiva de los resultados experimentales que se realizan, le permiten al personal encargado escribir informes técnicos y obtener conclusiones, que son verificados y aprobados posteriormente por la jefatura de la Sección.

## **4.2. Requisitos técnicos para la validación de los ensayos de galvanizado**

Son aquellos parámetros necesarios para garantizar la confiabilidad de los resultados que se realizan en el Laboratorio de Análisis Físicoquímico de la sección de Química Industrial.

### **4.2.1. Exactitud**

Se determinó utilizando los resultados de cobertura que se obtuvieron de la intercomparación de resultados y su desviación estándar con respecto a la media aritmética de los analistas.

#### **4.2.1.1. Norma ASTM A90-81**

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios para la cobertura ( $\text{g/cm}^2$ ) y su error relativo para la Norma ASTM A90-81.

Tabla III. **Error relativo porcentual (%ER) para cálculo de la cobertura**

<b>Analista</b>	<b>Cobertura (g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>%ER</b>
<b>IC-1</b>	0,0058	1,5063
<b>IC-2</b>	0,0059	3,9949
<b>IC-3</b>	0,0057	1,0055
<b>IC-4</b>	0,0062	8,5876
<b>IC-5</b>	0,0057	0,0317
<b>IC-6</b>	0,0054	5,2906
<b>IC-7</b>	0,0056	1,2413
<b>IC-8</b>	0,0052	8,5307
<b>Promedio</b>	0,0057	3,7736

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.1.2. Norma ASTM A239-89**

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios de los errores relativos por cada baño para la Norma ASTM A239-89.

Tabla IV. **Error relativo porcentual (%ER) para Norma ASTM A239-89 para IC-1, IC-2, IC-3 e IC-4**

Número de baños	%ER			
	IC-1	IC-2	IC-3	IC-4
<b>Inicial</b>	8,9783	7,1207	8,0495	0,9287
<b>1</b>	3,9664	5,9262	5,5996	4,6196
<b>2</b>	3,6947	6,4171	1,9931	4,3753
<b>3</b>	0,0506	6,7848	2,8860	4,6582
<b>4</b>	2,7792	7,8657	0,1573	5,6633
<b>5</b>	5,6100	6,9716	2,9411	8,8779
<b>Final</b>	2,4210	2,0000	0,1578	17,0526
<b>Promedio</b>	3,9286	6,1550	3,1121	6,5965

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Error relativo porcentual (%ER) para Norma ASTM A239-89 para IC-5, IC-6, IC-7 e IC-8**

Número de baños	%ER				Promedio
	IC-5	IC-6	IC-7	IC-8	
<b>Inicial</b>	2,1671	23,2198	0,3095	0,6191	7,2534
<b>1</b>	3,2197	15,6322	1,2599	1,5865	5,7462
<b>2</b>	3,1113	11,9591	1,4098	2,4307	4,7086
<b>3</b>	2,4303	12,0000	0,0506	2,7848	4,1229
<b>4</b>	0,9438	9,3864	0,5768	1,6780	3,9104
<b>5</b>	1,2527	7,1350	1,4161	1,0348	4,8863
<b>Final</b>	0,5263	0,2105	3,8947	0,5263	3,7518
<b>Promedio</b>	1,9502	11,3633	1,2739	1,5229	4,9114

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2. Precisión

Se determinó por medio de los promedios de cobertura, espesor y desviación estándar de los resultados de la intercomparación de datos para los 8 analistas. También se analizó el comportamiento de los Diagramas de Schewart, apéndice D.

##### 4.2.2.1. Norma ASTM A90-81

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios para la cobertura (g/cm<sup>2</sup>) y su desviación estándar para la Norma ASTM A90-81.

Tabla VI. Error de precisión porcentual (%ER) para Norma ASTM A90-81

Analista	Cobertura (g/cm <sup>2</sup> )	Desviación estándar	%ER
IC-1	0,0058	0,0003	5,0305
IC-2	0,0059	0,0002	3,9341
IC-3	0,0057	0,0003	4,5144
IC-4	0,0062	0,0007	11,4755
IC-5	0,0057	0,0004	6,3221
IC-6	0,0054	0,0003	5,9753
IC-7	0,0056	0,0001	1,9870
IC-8	0,0052	0,0003	5,3947
<b>Promedio</b>	0,0057	0,0003	4,9408

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.2.2. Norma ASTM A239-89

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios por cada baño y su desviación estándar para la Norma ASTM A239-89.

Tabla VII. Error de precisión porcentual (%ER) para Norma ASTM A239-89

Número de baños	Promedio Espesor (mm)	Desviación estándar	%ER
Inicial	0,3586	0,0088	2,4776
1	0,3408	0,0066	1,9575
2	0,3275	0,0064	1,9820
3	0,3145	0,0065	2,0872
4	0,3033	0,0053	1,7533
5	0,2918	0,0073	2,5213
Final	0,3013	0,0066	2,2144

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.3. Selectividad

El método de ensayo es selectivo, ya que el procedimiento de cada norma ha sido únicamente para determinar la cantidad de zinc disponible para cada muestra de lámina. Los reactivos para ambas normas, las concentraciones de los reactivos, la técnica de decapado y de inmersión son específicos para cinc según ha declarado las Normas ASTM A90-81 y ASTM A239-89.

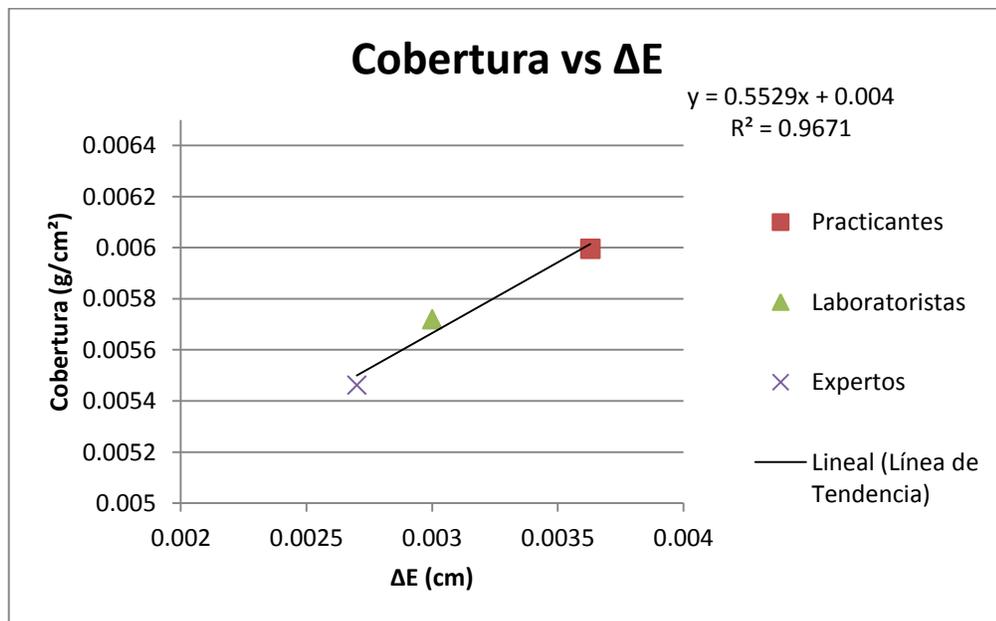
#### 4.2.4. Linealidad

Se determinó por medio de la figura 1 y figura 2, el comportamiento de los datos según cobertura, espesor y número de inmersiones bajo el parámetro del coeficiente de correlación.

##### 4.2.4.1. Norma ASTM A90-81

Se determinaron 3 grupos, según su experiencia en el análisis de los ensayos de galvanizado, para dividir a los analistas y poder observar el comportamiento por categoría de los datos.

Figura 1. Cobertura vs cambio de espesor para Norma ASTM A90-81

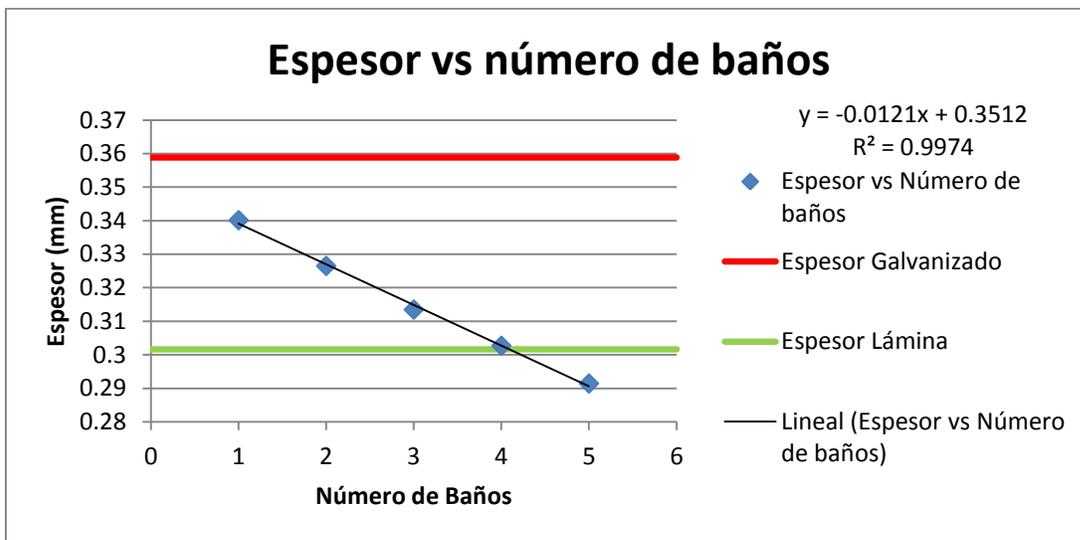


Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.4.2. Norma ASTM A239-89

Se determinaron 3 grupos, según su experiencia en el análisis de los ensayos de galvanizado, para dividir a los analistas y poder observar el comportamiento por categoría de los datos.

Figura 2. **Espesor vs número de baños para Norma ASTM A239-89**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.5. Límite de detección, límite de repetitividad y límite de cuantificación

Son los valores mínimos que son detectables, repetitivos y cuantificados durante el procedimiento de la norma y que permite fijar las condiciones de precisión en los equipos.

#### 4.2.5.1. Norma ASTM A90-81

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios para cada límite correspondiente para la Norma ASTM A90-81.

Tabla VIII. Límites para Norma ASTM A90-81

Límite de detección (g/cm <sup>2</sup> )	Límite de cuantificación (g/cm <sup>2</sup> )	Límite de repetitividad (g/cm <sup>2</sup> )
0,001	0,003	0,001

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.5.2. Norma ASTM A239-89

Se realizaron muestras en triplicado para cada analista por lo que se muestran los promedios para cada límite correspondiente para la Norma ASTM A90-81.

Tabla IX. Límites para Norma ASTM A239-89

Número de baños	Límite de detección (mm)	Límite de cuantificación (mm)	Límite de repetitividad (mm)
Inicial	0,0266	0,0888	0,0248
1	0,0200	0,0667	0,0186
2	0,0194	0,0649	0,0181
3	0,0196	0,0656	0,0183
4	0,0159	0,0531	0,0148
5	0,0220	0,0735	0,0206
Final	0,0200	0,0667	0,0186

Fuente: elaboración propia.

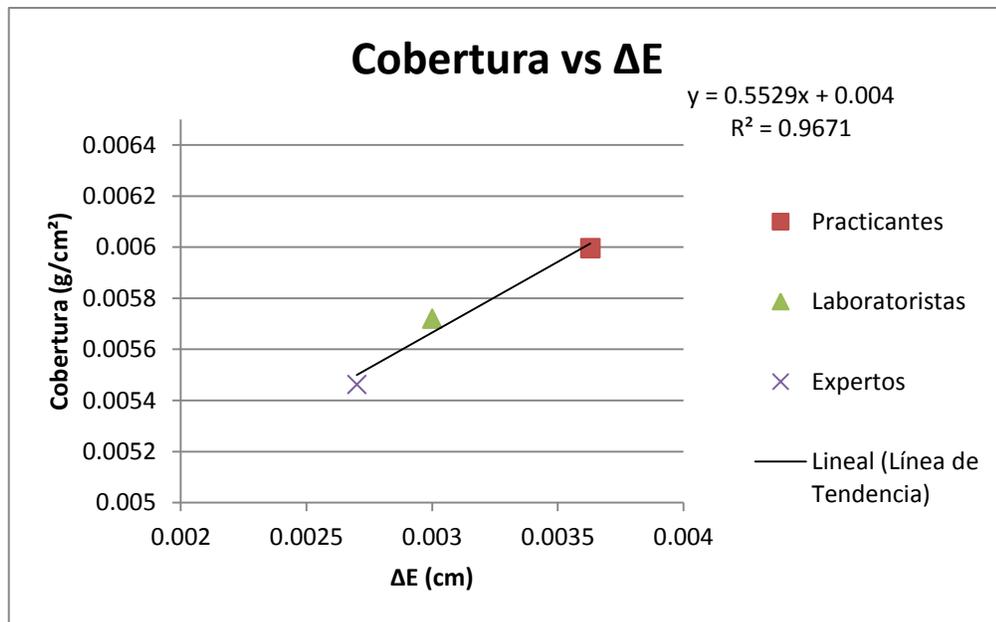
#### 4.2.6. Robustez

Hace referencia a la estabilidad del método, por lo que se evaluó repitiendo los pasos anteriores bajo las mismas circunstancias durante un período de 15 días, si la desviación de los resultados es menor al 5%, entonces el método es robusto.

#### 4.2.6.1. Norma ASTM A90-81

Al analizar la figura 3 y utilizando el porcentaje promedio del error relativo porcentual para la Norma ASTM A90-81 que es 4,94%, se puede determinar que el procedimiento analítico es capaz de no ser afectado por pequeñas pero deliberadas variaciones en los parámetros del método, provee entonces una indicación de su confiabilidad en condiciones de uso normales.

Figura 3. **Análisis de cobertura respecto al cambio de espesor para Norma ASTM A90-81**

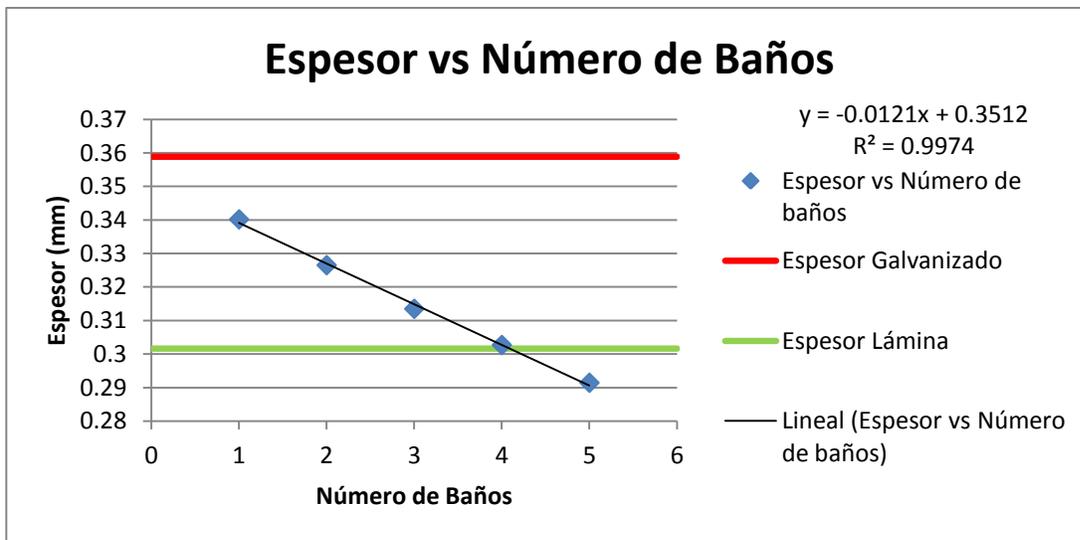


Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.6.2. Norma ASTM A239-89

Al analizar la figura 4 y utilizando el porcentaje promedio del error relativo porcentual para la Norma ASTM A239-89 que no es mayor a 2,53%, se puede determinar que el procedimiento analítico es capaz de no ser afectado por pequeñas pero deliberadas variaciones en los parámetros del método, provee entonces una indicación de su confiabilidad en condiciones de uso normales.

Figura 4. **Análisis de espesor respecto al número de baños para Norma ASTM A239-89**



Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.7. Análisis de varianza, prueba de Tukey, prueba de Fisher y DMS**

Permite determinar por medio de las diferentes pruebas si existe alguna diferencia significativa entre los resultados obtenidos por la intercomparación y sus promedios.

##### **4.2.7.1. Norma ASTM A90-81**

Las tablas siguientes son aquellos resultados que se obtuvieron por medio del programa Infostat (versión estudiantil), que permiten determinar un análisis completo para la Norma ASTM A90-81.

##### **4.2.7.1.1. Análisis de la varianza**

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la varianza que se obtiene entre las muestras y entre las medidas de cada muestra, así mismo define el coeficiente de variación para los datos.

Tabla X. **Análisis de la varianza**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,48	0,25	6,32

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Cuadro de análisis de la varianza (SC Tipo III)

F.V.	SC	GL	CM	F	p-valor
<b>Modelo</b>	1,90E-06	7	2,70E-07	2,1	0,104
<b>Analista</b>	1,90E-06	7	2,70E-07	2,1	0,104
<b>Error</b>	2,10E-06	16	1,30E-07		
<b>Total</b>	4,00E-06	23			

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.1.2. Prueba de Fisher y DMS

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la desviación que se obtiene entre las muestras, así mismo define la diferencia mínima significativa.

Tabla XII. Análisis de prueba de Fisher y DMS

Test: LSD Fisher		Alfa=0,05		DMS=0,00063		
Error: 0,0000			gl: 16			
Analista	Medias	n	E.E.			
IC-8	0,01	3	2,10E-04	A		
IC-6	0,01	3	2,10E-04	A	B	
IC-7	0,01	3	2,10E-04	A	B	C
IC-5	0,01	3	2,10E-04	A	B	C
IC-3	0,01	3	2,10E-04	A	B	C
IC-1	0,01	3	2,10E-04	A	B	C
IC-2	0,01	3	2,10E-04		B	C
IC-4	0,01	3	2,10E-04			C

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.1.3. Prueba de Tukey

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la desviación que se obtiene entre las muestras, así mismo define la diferencia mínima significativa y compara las medias entre sí.

Tabla XIII. **Análisis de prueba de Tukey**

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,00102	
Error: 0,0000			gl: 16	
Analista	Medias	n	E.E.	
IC-8	0,01	3	2,10E-04	A
IC-6	0,01	3	2,10E-04	A
IC-7	0,01	3	2,10E-04	A
IC-5	0,01	3	2,10E-04	A
IC-3	0,01	3	2,10E-04	A
IC-1	0,01	3	2,10E-04	A
IC-2	0,01	3	2,10E-04	A
IC-4	0,01	3	2,10E-04	A

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.2. Norma ASTM A239-89

Las tablas siguientes son aquellos resultados que se obtuvieron por medio del programa Infostat (versión estudiantil), que permiten determinar un análisis completo para la Norma ASTM A239-89.

#### 4.2.7.2.1. Análisis de la varianza

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la varianza que se obtiene entre las muestras y entre las medidas de cada muestra, así mismo define el coeficiente de variación para los datos.

Tabla XIV. **Análisis de la varianza para espesor Inicial**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,89	0,84	4,2

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Cuadro de análisis de la varianza para espesor inicial**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	3,00E-02	7	4,10E-03	18,07	0,0001
<b>Analista</b>	3,00E-02	7	4,10E-03	18,07	0,0001
<b>Error</b>	3,60E-03	16	2,30E-04		
<b>Total</b>	3,00E-02	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Análisis de la varianza para primer baño**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,92	0,89	2,39

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Cuadro de análisis de la varianza para primer baño**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,00E-02	7	1,80E-03	27,12	0,0001
<b>Analista</b>	1,00E-02	7	1,80E-03	27,12	0,0001
<b>Error</b>	1,10E-03	16	6,60E-05		
<b>Total</b>	1,00E-02	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Análisis de la varianza para segundo baño**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,86	0,8	2,69

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Cuadro de análisis de la varianza para segundo baño**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,00E-02	7	1,10E-03	13,97	0,0001
<b>Analista</b>	1,00E-02	7	1,10E-03	13,97	0,0001
<b>Error</b>	1,20E-03	16	7,80E-05		
<b>Total</b>	1,00E-02	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Análisis de la varianza para tercer baño**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,88	0,82	2,46

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Cuadro de análisis de la varianza para tercer baño**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,00E-02	7	9,80E-04	16,42	0,0001
<b>Analista</b>	1,00E-02	7	9,80E-04	16,42	0,0001
<b>Error</b>	9,60E-04	16	6,00E-05		
<b>Total</b>	1,00E-02	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Análisis de la varianza para cuarto baño**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,91	0,87	1,89

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Cuadro de análisis de la varianza para cuarto baño**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,00E-02	7	7,60E-04	23,11	0,0001
<b>Analista</b>	1,00E-02	7	7,60E-04	23,11	0,0001
<b>Error</b>	5,30E-04	16	3,30E-05		
<b>Total</b>	1,00E-02	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIV. **Análisis de la varianza para quinto baño**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,62	0,45	23,28

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXV. **Cuadro de análisis de la varianza para quinto baño**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,00E-01	7	1,00E-02	3,73	0,0138
<b>Analista</b>	1,00E-01	7	1,00E-02	3,73	0,0138
<b>Error</b>	6,00E-02	16	3,90E-03		
<b>Total</b>	1,60E-01	23			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVI. **Análisis de la varianza para espesor final**

<b>Variable</b>	<b>N</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>R<sup>2</sup> AJ</b>	<b>CV</b>
<b>Medidas</b>	24	0,39	0,13	3,42

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Cuadro de análisis de la varianza para espesor final**

<b>F.V.</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor</b>
<b>Modelo</b>	1,10E-03	7	1,60E-04	1,48	0,2416
<b>Analista</b>	1,10E-03	7	1,60E-04	1,48	0,2416
<b>Error</b>	1,70E-03	16	1,10E-04		
<b>Total</b>	2,80E-03	23			

Fuente: elaboración propia.

#### **4.2.7.2.2. Prueba de Fisher y DMS**

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la desviación que se obtiene entre las muestras, así mismo define la diferencia mínima significativa.

Tabla XXVIII. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para espesor inicial**

Test: LSD Fisher		Alfa=0,05	DMS=0,00063			
Error: 0,0002			gl: 16			
Analista	Medias	n	E.E.			
IC-1	0,33	3	1,00E-02	A		
IC-3	0,33	3	1,00E-02	A	B	
IC-2	0,33	3	1,00E-02	A	B	C
IC-4	0,36	3	1,00E-02		B	C
IC-8	0,36	3	1,00E-02			C
IC-7	0,36	3	1,00E-02			C
IC-5	0,37	3	1,00E-02			D
IC-6	0,44	3	1,00E-02			E

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIX. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para primer baño**

Test: LSD Fisher		Alfa=0,05	DMS=0,01408			
Error: 0,0001			gl: 16			
Analista	Medias	n	E.E.			
IC-2	0,32	3	4,70E-03	A		
IC-3	0,32	3	4,70E-03	A		
IC-4	0,32	3	4,70E-03	A		
IC-1	0,33	3	4,70E-03	A		
IC-7	0,34	3	4,70E-03		B	
IC-8	0,35	3	4,70E-03		B	
IC-5	0,35	3	4,70E-03		B	
IC-6	0,39	3	4,70E-03			C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXX. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para segundo baño**

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,01527							
Error: 0.0001			gl: 16				
Analista	Medias	n	E.E.				
IC-2	0,31	3	1,00E-02	A			
IC-4	0,31	3	1,00E-02	A			
IC-1	0,31	3	1,00E-02	A			
IC-3	0,32	3	1,00E-02	A	B		
IC-7	0,33	3	1,00E-02		B	C	
IC-8	0,33	3	1,00E-02		B	C	
IC-5	0,34	3	1,00E-02			C	
IC-6	0,37	3	1,00E-02				D

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXI. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para tercer baño**

Test: LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=0,01338							
Error: 0,0001			gl: 16				
Analista	Medias	n	E.E.				
IC-2	0,29	3	4,50E-03	A			
IC-4	0,30	3	4,50E-03	A			
IC-3	0,30	3	4,50E-03	A	B		
IC-7	0,31	3	4,50E-03		B	C	
IC-1	0,31	3	4,50E-03		B	C	
IC-5	0,32	3	4,50E-03			C	
IC-8	0,32	3	4,50E-03			C	
IC-6	0,35	3	4,50E-03				D

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXII. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para cuarto baño**

Test: LSD Fisher Alfa=0,05			DMS=0,00992		
Error: 0,0000			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-2	0,28	3	3,30E-03	A	
IC-4	0,29	3	3,30E-03	A	
IC-3	0,30	3	3,30E-03		B
IC-7	0,30	3	3,30E-03		B
IC-5	0,31	3	3,30E-03		B
IC-8	0,31	3	3,30E-03		B
IC-1	0,31	3	3,30E-03		B
IC-6	0,33	3	3,30E-03		C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIII. **Análisis de la prueba de Fisher y DMS para quinto baño**

Test: LSD Fisher Alfa=0,05			DMS=0,10750		
Error: 0,0039			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-3	0,1	3	4,00E-02	A	
IC-4	0,27	3	4,00E-02		B
IC-2	0,27	3	4,00E-02		B
IC-5	0,29	3	4,00E-02		B
IC-8	0,29	3	4,00E-02		B
IC-7	0,30	3	4,00E-02		B
IC-1	0,31	3	4,00E-02		B
IC-6	0,31	3	4,00E-02		B

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIV. Análisis de la prueba de Fisher y DMS para espesor final

Test: LSD Fisher Alfa=0,05			DMS=0,01782		
Error: 0,0001			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-4	0,29	3	1,00E-02	A	
IC-2	0,30	3	1,00E-02	A	B
IC-5	0,30	3	1,00E-02	A	B
IC-8	0,30	3	1,00E-02	A	B
IC-3	0,30	3	1,00E-02	A	B
IC-6	0,30	3	1,00E-02	A	B
IC-1	0,31	3	1,00E-02		B
IC-7	0,31	3	1,00E-02		B

Fuente: elaboración propia.

#### 4.2.7.2.3. Prueba de Tukey

Despliega los datos para el primer análisis a determinar según la desviación que se obtiene entre las muestras, así mismo define la diferencia mínima significativa y compara las medias entre sí.

Tabla XXXV. Análisis de la prueba de Tukey para espesor Inicial

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,04253	
Error: 0,0002			gl: 16	
Analista	Medias	n	E.E.	
IC-1	0,33	3	1,00E-02	A
IC-3	0,33	3	1,00E-02	A
IC-2	0,33	3	1,00E-02	A
IC-4	0,36	3	1,00E-02	A
IC-8	0,36	3	1,00E-02	A
IC-7	0,36	3	1,00E-02	A
IC-5	0,37	3	1,00E-02	A
IC-6	0,44	3	1,00E-02	B

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVI. Análisis de la prueba de Tukey para primer baño

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,0230	
Error: 0,0001			gl: 16	
Analista	Medias	n	E.E.	
IC-2	0,32	3	4,70E-03	A
IC-3	0,32	3	4,70E-03	A
IC-4	0,32	3	4,70E-03	A B
IC-1	0,33	3	4,70E-03	A B
IC-7	0,34	3	4,70E-03	B C
IC-8	0,35	3	4,70E-03	B C
IC-5	0,35	3	4,70E-03	C
IC-6	0,39	3	4,70E-03	D

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVII. **Análisis de la prueba de Tukey para segundo baño**

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,02493		
Error: 0,0001			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-2	0,31	3	1,00E-02	A	
IC-4	0,31	3	1,00E-02	A	B
IC-1	0,31	3	1,00E-02	A	B
IC-3	0,32	3	1,00E-02	A	B
IC-7	0,33	3	1,00E-02		B
IC-8	0,33	3	1,00E-02		B
IC-5	0,34	3	1,00E-02		B
IC-6	0,37	3	1,00E-02		C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXVIII. **Análisis de la prueba de Tukey para tercer baño**

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,02185		
Error: 0,0001			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-2	0,29	3	4,50E-03	A	
IC-4	0,30	3	4,50E-03	A	
IC-3	0,30	3	4,50E-03	A	B
IC-7	0,31	3	4,50E-03	A	B
IC-1	0,31	3	4,50E-03		B
IC-5	0,32	3	4,50E-03		B
IC-8	0,32	3	4,50E-03		B
IC-6	0,35	3	4,50E-03		C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXXIX. **Análisis de la prueba de Tukey para cuarto baño**

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,01621		
Error: 0,0000			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-2	0,28	3	3,30E-03	A	
IC-4	0,29	3	3,30E-03	A	
IC-3	0,30	3	3,30E-03		B
IC-7	0,30	3	3,30E-03		B
IC-5	0,31	3	3,30E-03		B
IC-8	0,31	3	3,30E-03		B
IC-1	0,31	3	3,30E-03		B
IC-6	0,33	3	3,30E-03		C

Fuente: elaboración propia.

Tabla XL. **Análisis de la prueba de Tukey para quinto baño**

Test: Tukey Alfa=0,05			DMS=0,17557		
Error: 0,0039			gl: 16		
Analista	Medias	n	E.E.		
IC-3	0,10	3	4,00E-02	A	
IC-4	0,27	3	4,00E-02	A	B
IC-2	0,27	3	4,00E-02	A	B
IC-5	0,29	3	4,00E-02		B
IC-8	0,29	3	4,00E-02		B
IC-7	0,30	3	4,00E-02		B
IC-1	0,31	3	4,00E-02		B
IC-6	0,31	3	4,00E-02		B

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLI. **Análisis de la prueba de Tukey para espesor final**

<b>Test: Tukey Alfa=0,05</b>			<b>DMS=0,02911</b>	
<b>Error: 0,0001</b>			<b>gl: 16</b>	
<b>Analista</b>	<b>Medias</b>	<b>n</b>	<b>E.E.</b>	
<b>IC-4</b>	0,29	3	1,00E-02	A
<b>IC-2</b>	0,30	3	1,00E-02	A
<b>IC-5</b>	0,30	3	1,00E-02	A
<b>IC-8</b>	0,30	3	1,00E-02	A
<b>IC-3</b>	0,30	3	1,00E-02	A
<b>IC-6</b>	0,30	3	1,00E-02	A
<b>IC-1</b>	0,31	3	1,00E-02	A
<b>IC-7</b>	0,31	3	1,00E-02	A

Fuente: elaboración propia.

## 5. INTERPRETACION DE RESULTADOS

Se llevo a cabo la evaluación e implementación de la validación técnica en la realización de los Ensayos de Galvanizado, que se llevan a cabo en el Laboratorio de Química Industrial (USAC), en base a las Normas ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado) para artículos de hierro o acero y ASTM A239-89 Método de ensayo estándar para localizar el punto más delgado en un recubrimiento de cinc en artículos de hierro o acero mediante la prueba de Preece (inmersión en sulfato de cobre).

El Laboratorio de Fisicoquímica de la sección de Química Industrial realiza una serie de ensayos de control de calidad, tanto a materia prima como a productos terminados. En cada ensayo acreditado el personal encargado debe aplicar de forma ordenada, los requisitos establecidos por la norma; desde los implementos de seguridad como guantes, lentes, bata, etc., hasta el equipo y la cristalería adecuada para cada prueba. Cada ensayo cuenta con su proceso de realización de manera ordenada y clara en el manual de calidad, el cual es aprobado y verificado por la Dirección.

El Laboratorio se encuentra debidamente equipado, por lo que para los ensayos de galvanizado se cuenta con una balanza calibrada, reactivos óptimos y de grado reactivo, un vernier calibrado y cristalería certificada. Todo esto para determinar los requisitos iniciales que se necesitan para evaluar la capacidad del Laboratorio para la validación de los ensayos de galvanizado. Por lo que cumple con los requisitos iniciales.

Con lo que respecta a la Norma ASTM A90-81 Método de ensayo estándar para el peso del revestimiento de cinc-recubierto (galvanizado) para artículos de hierro o acero, las muestras fueron preparadas de acuerdo a las indicaciones de la Norma. Desde que deben ser libres de abrasión hasta la aplicación de algún solvente orgánico para limpiarlas, en este caso se aplicó alcohol isopropílico. Lo único que se agregó para preparar las muestras fue que se introdujeron dentro de la desecadora para evitar variaciones por humedad que puedan afectar a las muestras.

Las muestras fueron cortadas de una lámina comercial de 6 pies de ancho por 1 pie de largo. Los cortes fueron realizados con una tijera especial para cortar lámina y las medidas de las muestras se realizaron con escalímetro y escuadras milimétricas. Para evitar errores en las mediciones de área se utilizó la técnica de la relación peso/área por medio de una hoja de referencia con medidas y cobertura certificada por la empresa que la fabricó. Dicha técnica constató el área de las muestras, para un área teórica de 5 centímetros cuadrados.

Luego del corte y el cálculo del área de las muestras se realizó el procedimiento indicado por la Norma ASTM A90-81 que corresponde al decapado por medio del Método Alternativo, es decir una mezcla del 50% de ácido clorhídrico y 50% de agua grado reactivo Tipo IV.

Durante la intercomparación de resultados por parte de los 8 analistas, se les presentó un diagrama de flujo para el procedimiento y asegurarse que el procedimiento sea realizado de la misma forma para cada uno de ellos, siempre bajo la supervisión del tesista y con muestras triplicadas para cada analista. Los resultados que se obtuvieron según la tabla III se puede observar

que el error relativo para exactitud no fue mayor al 5%, cumpliéndose así la condición para validar el método como exacto.

Así mismo, para la tabla VI en la evaluación de la precisión del método cabe resaltar que el error relativo porcentual promedio no fue mayor al 5%, cumpliéndose así la condición para validar el método como preciso, incluyendo los diagramas de Schewart que se encuentran en los anexos.

Aunque en algunos casos específicos se observó el no cumplimiento de los mismos, en promedio los resultados son satisfactorios. Mientras que para la linealidad del método se realizó graficando la totalidad de los datos por medio de la simplificación a tres grupos, los cuales son: Practicantes, laboratoristas y expertos. Este hecho para simplificar únicamente los datos, observando así que el coeficiente de correlación es mayor a 0,96 y por ende, se cumple con el requisito principal de linealidad.

Para los límites de detección, cuantificación y repetitividad se observa un comportamiento adecuado para la interpretación de los resultados, ya que son los valores mínimos que pueden ser detectados en el cálculo de la cobertura del método. Para el parámetro de la robustez del método se analiza de manera sistemática el comportamiento del ensayo, ya que fue realizado por 8 analistas en 15 días hábiles, y encontrándose un error relativo menor al 5%, en promedio, se puede determinar que el procedimiento analítico es capaz de no ser afectado por pequeñas pero deliberadas variaciones en los parámetros del método, provee entonces una indicación de su confiabilidad en condiciones de uso normales.

Y para finalizar el análisis estadístico se tomaron en cuenta el ANOVA, la Prueba de Fisher, la Prueba de Tukey y DMS para determinar las variaciones que puedan afectar en la realización del método. Para esto se recurrió al *Software* Infostat que es un programa que realiza todo tipo de pruebas estadísticas. Por lo que al comparar los resultados se puede determinar como valido el método de la Norma ASTM A90-81.

Para la Norma ASTM A239-89, se realizaron las mismas pautas en la validación del ensayo con respecto a la preparación de la muestras y se analizaron los resultados por medio de la Intercomparación de datos para los 8 analistas en sus 15 días hábiles de realización.

Para evaluar la exactitud del método se recurre a las tablas IV y V, observando claramente que el error relativo tampoco es mayor al 5%, cumpliendo así con el requisito de exactitud.

Para evaluar la precisión del método se observa la tabla VII donde satisfactoriamente cumple con el requisito, además del análisis de los diagramas de Schewart que se encuentran en el anexo. Mientras que para la linealidad del método al observar la figura 2 que el coeficiente de correlación es mayor a 0,96 debido a la tendencia del método, es claro que cumple con los requisitos necesarios.

Los límites de cuantificación, repetitividad y de detección permiten encontrar los valores mínimos acerca del espesor de la lámina al sufrir los cambios en cada inmersión de sulfato de cobre (36 gramos sulfato de cobre en 100 gramos de agua grado reactivo).

Para la robustez del método se observa la figura 4 donde el error no es mayor al 5%, entonces permite determinar que el procedimiento analítico es capaz de no ser afectado por pequeñas pero deliberadas variaciones en los parámetros del método, provee entonces una indicación de su confiabilidad en condiciones de uso normales. Y para finalizar el análisis estadístico realizado con el programa Infostat determinar que no hay cambios significativos en la realización del ensayo, por lo que el método de la Norma ASTM A239-89 es preciso y válido en su procedimiento.

Concluyendo así, ambos métodos cumplen los requisitos para ser válidos en su totalidad.



## CONCLUSIONES

1. Los ensayos de galvanizado bajo las Normas ASTM A90-81 y ASTM A239-89 son válidos para su implementación en el Laboratorio de la sección de Química Industrial, de acuerdo al cumplimiento de los requisitos establecidos por exactitud, precisión, linealidad, selectividad, límite de detección, límite de cuantificación, límite de repetitividad, robustez y análisis estadístico.
2. El ensayo de galvanizado bajo la Norma ASTM A90-81, que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de la Sección de Química Industrial es exacto, ya que el error relativo promedio es menor al 5%.
3. El ensayo de galvanizado bajo la Norma ASTM A239-89 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es exacto, ya que el error relativo porcentual promedio es menor al 5%.
4. El ensayo de galvanizado bajo la Norma ASTM A90-81 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es preciso, ya que el error promedio es menor al 5% en la intercomparación de resultados.
5. El ensayo de galvanizado bajo la Norma ASTM A239-89 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es preciso, ya que el error promedio es menor al 5% en la intercomparación de resultados.

6. El ensayo de galvanizado bajo la Norma A90-81 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es lineal, ya que el coeficiente de correlación es mayor a 0,96.
7. El ensayo de galvanizado bajo la Norma A239-89 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es lineal, ya que el coeficiente de correlación es mayor a 0,96.
8. El ensayo de galvanizado bajo la Norma A90-81 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es robusto, ya que al realizar la intercomparación de resultados entre 8 analistas en 15 días hábiles diferentes, su error fue menor al 5% requerido.
9. El ensayo de galvanizado bajo la Norma A239-89 que fue evaluado e implementado en el Laboratorio de Química Industrial es robusto, ya que al realizar la intercomparación de resultados entre 8 analistas en 15 días hábiles diferentes, su error fue menor al 5% requerido.
10. Los ensayos de galvanizado bajo las Normas A90-81 y ASTM A239-89 cumplen con el análisis estadístico, ya que no se encontraron diferencias significativas en las Pruebas de Tukey, Fisher, DMS y ANOVA por lo que son aptos para su implementación en el Laboratorio de la Sección de Química Industrial.

## RECOMENDACIONES

1. Realizar una comparación entre el Método Alternativo (ácido clorhídrico (1+1)) y el Método de Referencia (ácido clorhídrico en tricloruro de antimonio) bajo la Norma ASTM A90-81 para determinar sus diferencias.
2. Realizar pruebas de corte con una guillotina o troqueladora y evaluar sus resultados para con los ensayos de galvanizado.
3. Evaluar para la Norma ASTM A239-89 por medio de un análisis colorimétrico la relación entre el peso del cobre que se genera y el cambio de coloración, para encontrar el punto final con mayor exactitud.
4. Realizar una comparación entre los resultados que se obtienen por medio del Vernier y un equipo más exacto para medir espesores como un medidor de capa que utiliza el proceso de inducción magnética.
5. Evaluar que efectos conllevan pequeñas cantidades de diferentes metales que puedan contaminar las muestras en los resultados de las Normas y determinar si se encuentran falsos positivos.
6. Obtener o preparar patrones de referencia para la determinación de las áreas de las muestras por medio de la relación peso/área.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ASKELAND, Donald R. *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 4a ed. México: Thomson, 2004. 1032 p.
2. GONZÁLEZ, Carlos. *ISO 9000 QS-9000 MR, ISO 14000: Normas internacionales de administración de calidad, sistemas de calidad y sistemas ambientales*. México: McGraw-Hill, 1999. 420 p.
3. GUTIÉRREZ, Humberto. *Calidad total y productividad*. 2a ed. México: McGraw-Hill, 2005. 403 p.
4. JAMES, Paul. *La gestión de la calidad total: un texto introductorio*. Madrid: Prentice Hall, 1997. 225 p.
5. KEYSER, Carl A. *Ciencia de materiales para ingeniería*. México: Limusa, 1993. 460 p.
6. MILLER, J.C. *Estadística para química analítica*. 2a ed. Colombia: Addison-Wesley Iberoamericana, 1988. 113 p.
7. NAVA, Víctor. *ISO 9000:2000: estrategias para implementar la norma de calidad para la mejora continua*. México: Limusa, 2007. 138 p.



## APÉNDICE

Apéndice A: Datos preliminares.....	73
Apéndice B: Datos calculados para Norma ASTM A90-81 .....	75
Apéndice C: Datos calculados para Norma ASTM A239-89.....	75
Apéndice D: Diagramas de Schewart .....	77
Apendice E: Imágenes de los ensayos .....	143
Apéndice F: Árbol de problemas.....	151
Apéndice G: Tabla de requisitos académicos .....	153



## Apéndice A: Datos preliminares

### Códigos y analistas para la intercomparación de muestras.

<b>Código</b>	<b>Analista</b>
IC-1	Br. Gerardo De León
IC-2	Br. Byron Roldán
IC-3	Br. Carolina Corzo
IC-4	Br. Edna Dardón
IC-5	Br. Roberto Cancinos
IC-6	Lic. Ingrid Benítez
IC-7	Br. Héctor Méndez
IC-8	Ing. Adrián Soberanis

Fuente: elaboración propia.



## Apéndice B: Datos calculados para Norma ASTM A90-81

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-1

Código IC-1	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,489	6,168	0,380	0,300	0,205
	6,489	6,169	0,370	0,300	0,205
	6,488	6,167	0,380	0,300	0,204
<b>Promedio</b>	6,489	6,168	0,377	0,300	0,205
<b>Desviación</b>	0,0005	0,001	0,006	0,000	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,323	6,037	0,320	0,300	0,194
	6,325	6,037	0,320	0,300	0,195
	6,325	6,036	0,320	0,300	0,194
<b>Promedio</b>	6,324	6,036	0,320	0,300	0,194
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001
<b>Muestra 3</b>	6,295	6,009	0,320	0,300	0,192
	6,294	6,009	0,320	0,310	0,194
	6,294	6,011	0,320	0,300	0,193
<b>Promedio</b>	6,2943	6,010	0,320	0,303	0,193
<b>Desviación</b>	0,0005	0,001	0,000	0,006	0,001

Fuente: elaboración propia.

**Cobertura y área de muestra para IC-1**

<b>Código IC-1</b>	<b>Área HR (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Área Muestra (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Cobertura</b>		
			<b>(g/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Promedio</b>	<b>Desviación</b>
<b>Muestra 1</b>	602,64	52,1404	0,0061	0,0061	1,136E-05
		52,1404	0,0061		
		52,1323	0,0061		
<b>Muestra 2</b>	602,64	50,8065	0,0056	0,0056	2,909E-05
		50,8226	0,0056		
		50,8226	0,0056		
<b>Muestra 3</b>	602,64	50,5815	0,0056	0,0056	2,981E-05
		50,5735	0,0056		
		50,5735	0,0055		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-1

Código IC-1	$\Delta E$			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,008	0,0077	0,0006	0,7695	0,8053	0,0618
	0,007			0,8767		
	0,008			0,7696		
Muestra 2	0,002	0,0020	0,000	2,8145	2,8304	0,0145
	0,002			2,8333		
	0,002			2,8432		
Muestra 3	0,002	0,0017	0,0006	2,8271	3,7534	1,6298
	0,001			5,6353		
	0,002			2,7979		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-2

Código IC-2	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,314	6,000	0,330	0,300	0,199
	6,314	5,999	0,330	0,300	0,200
	6,315	6,001	0,340	0,300	0,200
<b>Promedio</b>	6,314	6,000	0,333	0,300	0,200
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,006	0,000	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,434	6,128	0,330	0,300	0,199
	6,434	6,125	0,330	0,310	0,198
	6,434	6,127	0,330	0,300	0,198
<b>Promedio</b>	6,434	6,127	0,330	0,303	0,198
<b>Desviación</b>	0,000	0,002	0,000	0,006	0,001
<b>Muestra 3</b>	6,257	5,969	0,330	0,290	0,202
	6,259	5,973	0,330	0,300	0,201
	6,259	5,969	0,320	0,290	0,201
<b>Promedio</b>	6,258	5,970	0,327	0,293	0,201
<b>Desviación</b>	0,001	0,002	0,006	0,006	0,001

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-2

Código IC-2	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
<b>Muestra 1</b>	602,64	50,7342	0,0062	0,0062	1,1673E-05
		50,7342	0,0062		
		50,7422	0,0062		
<b>Muestra 2</b>	602,64	51,6984	0,0059	0,0059	2,9546E-05
		51,6984	0,0060		
		51,6984	0,0059		
<b>Muestra 3</b>	602,64	50,2762	0,0057	0,0057	3,9781E-05
		50,2923	0,0057		
		50,2923	0,0578		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-2

Código IC-2	ΔE			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm³)	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,003	0,0033	0,0006	2,0630	1,8932	0,2998
	0,003			2,0696		
	0,004			1,5470		
Muestra 2	0,003	0,0027	0,0006	1,9730	2,3136	0,5844
	0,002			2,9885		
	0,003			1,9794		
Muestra 3	0,004	0,0033	0,0006	1,4321	1,7500	0,2756
	0,003			1,8956		
	0,003			1,9221		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-3

Código IC-3	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,190	5,888	0,320	0,310	0,195
	6,190	5,889	0,320	0,310	0,195
	6,189	5,887	0,320	0,310	0,196
<b>Promedio</b>	6,190	5,888	0,320	0,310	0,195
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,274	5,985	0,320	0,300	0,194
	6,274	5,985	0,330	0,310	0,194
	6,275	5,985	0,320	0,300	0,194
<b>Promedio</b>	6,274	5,985	0,323	0,303	0,194
<b>Desviación</b>	0,001	0,000	0,006	0,006	0,000
<b>Muestra 3</b>	6,213	5,936	0,320	0,310	0,192
	6,212	5,935	0,320	0,310	0,192
	6,212	5,935	0,320	0,310	0,193
<b>Promedio</b>	6,212	5,935	0,320	0,310	0,192
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-3

Código IC-3	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
<b>Muestra 1</b>	602,64	49,7379	0,0061	0,0061	1,1901E-05
		49,7379	0,0061		
		49,7298	0,0061		
<b>Muestra 2</b>	602,64	50,4128	0,0057	0,0057	1,0923E-05
		50,4128	0,0057		
		50,4208	0,0058		
<b>Muestra 3</b>	602,64	49,9226	0,0055	0,0055	5,1569E-07
		49,9146	0,0055		
		49,9146	0,0055		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-3

Código IC-3	$\Delta E$			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Desviación
<b>Muestra 1</b>	0,001	0,001	0,000	6,0718	6,0654	0,0119
	0,001			6,0517		
	0,001			6,0728		
<b>Muestra 2</b>	0,002	0,002	0,000	2,8663	2,8694	0,0055
	0,002			2,8663		
	0,002			2,8758		
<b>Muestra 3</b>	0,001	0,001	0,000	5,5486	5,5491	0,0005
	0,001			5,5495		
	0,001			5,5494		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-4

Código IC-4	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,216	5,864	0,390	0,340	0,194
	6,216	5,864	0,380	0,330	0,193
	6,216	5,865	0,380	0,340	0,194
<b>Promedio</b>	6,216	5,864	0,383	0,337	0,194
<b>Desviación</b>	0,000	0,001	0,006	0,006	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,275	5,987	0,360	0,340	0,189
	6,276	5,977	0,360	0,330	0,188
	6,275	5,976	0,370	0,330	0,189
<b>Promedio</b>	6,275	5,980	0,363	0,333	0,189
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,006	0,006	0,001
<b>Muestra 3</b>	6,222	5,937	0,360	0,300	0,187
	6,227	5,936	0,350	0,320	0,187
	6,224	5,936	0,360	0,320	0,187
<b>Promedio</b>	6,224	5,936	0,357	0,313	0,187
<b>Desviación</b>	0,003	0,001	0,006	0,012	0,000

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-4

Código IC-4	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	602,64	49,9468	0,0070	0,0070	1,1559E-05
		49,9468	0,0070		
		49,9468	0,0070		
Muestra 2	602,64	50,4208	0,0057	0,0058	0,0001
		50,4289	0,0059		
		50,4208	0,0059		
Muestra 3	602,64	49,9950	0,0057	0,0058	5,7669E-05
		50,0351	0,0058		
		50,0110	0,0058		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-4

Código IC-4	$\Delta E$			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,005	0,0047	0,0006	1,4095	1,5252	0,2006
	0,005			1,4095		
	0,004			1,7569		
Muestra 2	0,002	0,0030	0,0010	2,8560	2,1050	0,6957
	0,003			1,9764		
	0,004			1,4825		
Muestra 3	0,006	0,0043	0,0015	0,9501	1,4428	0,4943
	0,003			1,9386		
	0,004			1,4397		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-5

Código IC-5	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,339	6,045	0,350	0,290	0,201
	6,340	6,044	0,370	0,300	0,200
	6,339	6,045	0,360	0,300	0,201
<b>Promedio</b>	6,339	6,045	0,360	0,300	0,201
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,010	0,006	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,305	5,998	0,380	0,310	0,197
	6,304	5,998	0,370	0,300	0,198
	6,305	5,998	0,360	0,290	0,198
<b>Promedio</b>	6,305	5,998	0,370	0,300	0,198
<b>Desviación</b>	0,001	0,000	0,010	0,010	0,001
<b>Muestra 3</b>	6,343	6,071	0,360	0,300	0,199
	6,342	6,070	0,370	0,310	0,200
	6,343	6,071	0,380	0,300	0,200
<b>Promedio</b>	6,343	6,071	0,370	0,303	0,200
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,010	0,006	0,001

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-5

Código IC-5	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
<b>Muestra 1</b>	602,64	50,9351	0,0058	0,0058	2,2140E-05
		50,9432	0,0058		
		50,9351	0,0058		
<b>Muestra 2</b>	602,64	50,6619	0,0061	0,0061	1,0843E-05
		50,6539	0,0060		
		50,6619	0,0061		
<b>Muestra 3</b>	602,64	50,9673	0,0053	0,0053	4,8584E-07
		50,9592	0,0053		
		50,9673	0,0053		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-5

Código IC-5	ΔE			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm³)	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,006	0,0063	0,0006	0,9620	0,9180	0,0762
	0,007			0,8301		
	0,006			0,9620		
Muestra 2	0,007	0,0070	0,0000	0,8657	0,8648	0,0015
	0,007			0,8630		
	0,007			0,8657		
Muestra 3	0,006	0,0067	0,0012	0,8895	0,8154	0,1284
	0,006			0,8896		
	0,008			0,6671		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-6

Código IC-6	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,312	6,036	0,350	0,310	0,197
	6,311	6,025	0,390	0,290	0,197
	6,311	6,025	0,350	0,300	0,197
<b>Promedio</b>	6,311	6,029	0,363	0,300	0,197
<b>Desviación</b>	0,001	0,006	0,023	0,010	0,000
<b>Muestra 2</b>	6,356	6,066	0,340	0,310	0,197
	6,356	6,070	0,390	0,320	0,197
	6,355	6,066	0,350	0,300	0,197
<b>Promedio</b>	6,356	6,067	0,360	0,310	0,197
<b>Desviación</b>	0,001	0,002	0,027	0,010	0,000
<b>Muestra 3</b>	6,305	6,049	0,410	0,290	0,194
	6,307	6,051	0,380	0,300	0,194
	6,307	6,051	0,440	0,300	0,194
<b>Promedio</b>	6,306	6,050	0,410	0,297	0,194
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,030	0,006	0,000

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-6

Código IC-6	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	602,64	50,7182	0,0054	0,0056	0,0001
		50,7101	0,0056		
		50,7101	0,0056		
Muestra 2	602,64	51,0717	0,0057	0,0056	4,0905E-05
		51,0717	0,0056		
		51,0637	0,0057		
Muestra 3	602,64	50,6619	0,0051	0,0051	0,0000
		50,6780	0,0051		
		50,6780	0,0051		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-6

Código IC-6	ΔE			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm³)	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,004	0,0063	0,0032	1,3605	1,0175	0,4096
	0,010			0,5640		
	0,005			1,1280		
Muestra 2	0,003	0,0050	0,0020	1,8928	1,2749	0,5602
	0,007			0,8000		
	0,005			1,1319		
Muestra 3	0,012	0,0113	0,0031	0,4210	0,4711	0,1421
	0,008			0,6314		
	0,014			0,3608		

Fuente: elaboración propia.

**Análisis de peso y espesor de muestra para IC-7**

<b>Código IC-7</b>	<b>Peso (g)</b>		<b>Espesor (mm)</b>		<b>Peso HR (g)</b>
	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	<b>Inicial</b>	<b>Final</b>	
<b>Muestra 1</b>	6,303	6,013	0,340	0,300	0,201
	6,303	6,011	0,380	0,320	0,202
	6,303	6,012	0,350	0,310	0,202
<b>Promedio</b>	6,303	6,012	0,357	0,310	0,202
<b>Desviación</b>	0,000	0,001	0,021	0,010	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,304	6,016	0,360	0,310	0,196
	6,305	6,016	0,350	0,310	0,197
	6,304	6,016	0,380	0,340	0,197
<b>Promedio</b>	6,304	6,016	0,363	0,320	0,197
<b>Desviación</b>	0,001	0,000	0,015	0,017	0,001
<b>Muestra 3</b>	6,173	5,899	0,390	0,340	0,194
	6,172	5,900	0,380	0,330	0,192
	6,177	5,900	0,360	0,310	0,192
<b>Promedio</b>	6,174	5,900	0,377	0,327	0,193
<b>Desviación</b>	0,003	0,001	0,015	0,015	0,001

Fuente: elaboración propia.

**Cobertura y área de muestra para IC-7**

Código IC-7	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	602,64	50,6459	0,0057	0,0057	1,9744E-05
		50,6459	0,0058		
		50,6459	0,0057		
Muestra 2	602,64	50,6539	0,0057	0,0057	0,0000
		50,6619	0,0057		
		50,6539	0,0057		
Muestra 3	602,64	49,6013	0,0055	0,0055	4,8411E-05
		49,5933	0,0055		
		49,6334	0,0056		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-7

Código IC-7	$\Delta E$			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,004	0,0047	0,0012	1,4315	1,2762	0,2731
	0,006			0,9609		
	0,004			1,4364		
Muestra 2	0,005	0,0043	0,0006	1,1371	1,3282	0,1655
	0,004			1,4261		
	0,004			1,4214		
Muestra 3	0,005	0,0050	0,0000	1,1048	1,1060	0,0097
	0,005			1,0969		
	0,005			1,1162		

Fuente: elaboración propia.

### Análisis de peso y espesor de muestra para IC-8

Código IC-8	Peso (g)		Espesor (mm)		Peso HR (g)
	Inicial	Final	Inicial	Final	
<b>Muestra 1</b>	6,232	5,967	0,410	0,370	0,203
	6,228	5,968	0,420	0,390	0,205
	6,227	5,969	0,430	0,370	0,204
<b>Promedio</b>	6,229	5,968	0,420	0,377	0,204
<b>Desviación</b>	0,003	0,001	0,010	0,012	0,001
<b>Muestra 2</b>	6,178	5,933	0,420	0,370	0,198
	6,180	5,931	0,420	0,390	0,198
	6,178	5,932	0,420	0,370	0,198
<b>Promedio</b>	6,179	5,932	0,420	0,377	0,198
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,000	0,012	0,000
<b>Muestra 3</b>	6,105	5,833	0,400	0,370	0,199
	6,104	5,832	0,410	0,380	0,198
	6,103	5,833	0,420	0,370	0,198
<b>Promedio</b>	6,104	5,832	0,410	0,373	0,198
<b>Desviación</b>	0,001	0,001	0,010	0,006	0,001

Fuente: elaboración propia.

### Cobertura y área de muestra para IC-8

Código IC-8	Área HR (cm <sup>2</sup> )	Área Muestra (cm <sup>2</sup> )	Cobertura		
			(g/cm <sup>2</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	602,64	50,0754	0,0053	0,0052	6,9819E-05
		50,0432	0,0052		
		50,0352	0,0052		
Muestra 2	602,64	49,6415	0,0049	0,0050	4,1025E-05
		49,6575	0,0050		
		49,6415	0,0050		
Muestra 3	602,64	49,0549	0,0055	0,0055	0,0000
		49,0469	0,0055		
		49,0388	0,0055		

Fuente: elaboración propia.

### Cambio de espesor y densidad de muestra para IC-8

Código IC-8	$\Delta E$			Densidad		
	(cm)	Promedio	Desviación	(g/cm <sup>3</sup> )	Promedio	Desviación
Muestra 1	0,004	0,0043	0,0015	1,3230	1,3047	0,4365
	0,003			1,7318		
	0,006			0,8594		
Muestra 2	0,005	0,0043	0,0012	0,9871	1,2165	0,3940
	0,003			1,6714		
	0,005			0,9911		
Muestra 3	0,003	0,0037	0,0012	1,8483	1,5993	0,4314
	0,003			1,8486		
	0,005			1,1011		

Fuente: elaboración propia.

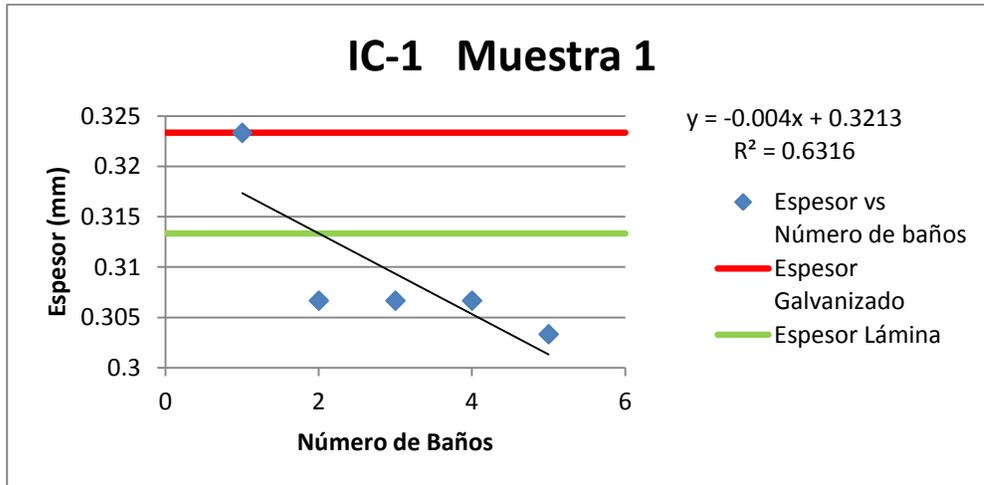
### Apéndice C: Datos Calculados para Norma A239-89

#### Promedio de espesor para Muestra 1 de IC-1

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,32	0,33	0,32	0.3233	0.0058
<b>1</b>	0,32	0,33	0,32	0.3233	0.0058
<b>2</b>	0,31	0,31	0,30	0.3067	0.0058
<b>3</b>	0,31	0,31	0,30	0.3067	0.0058
<b>4</b>	0,31	0,31	0,30	0.3067	0.0058
<b>5</b>	0,31	0,30	0,30	0.3033	0.0058
<b>Final</b>	0,30	0,32	0,32	0.3133	0.0115

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-1



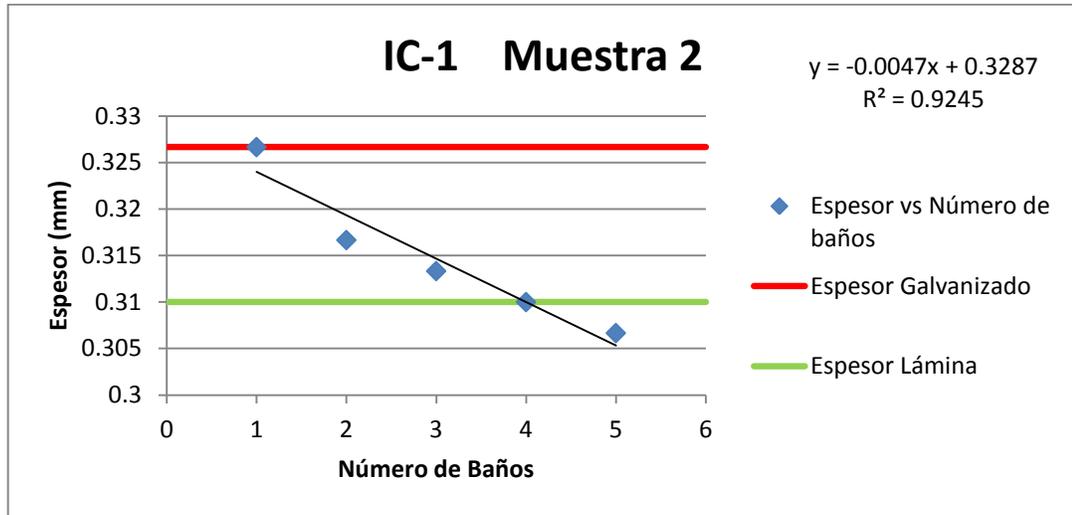
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-1

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,32	0,32	0,34	0,3267	0,0115
<b>1</b>	0,32	0,32	0,34	0,3267	0,0115
<b>2</b>	0,31	0,31	0,33	0,3167	0,0115
<b>3</b>	0,31	0,30	0,33	0,3133	0,0152
<b>4</b>	0,31	0,30	0,32	0,3100	0,0100
<b>5</b>	0,30	0,30	0,32	0,3067	0,0115
<b>Final</b>	0,30	0,33	0,30	0,3100	0,0173

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-1



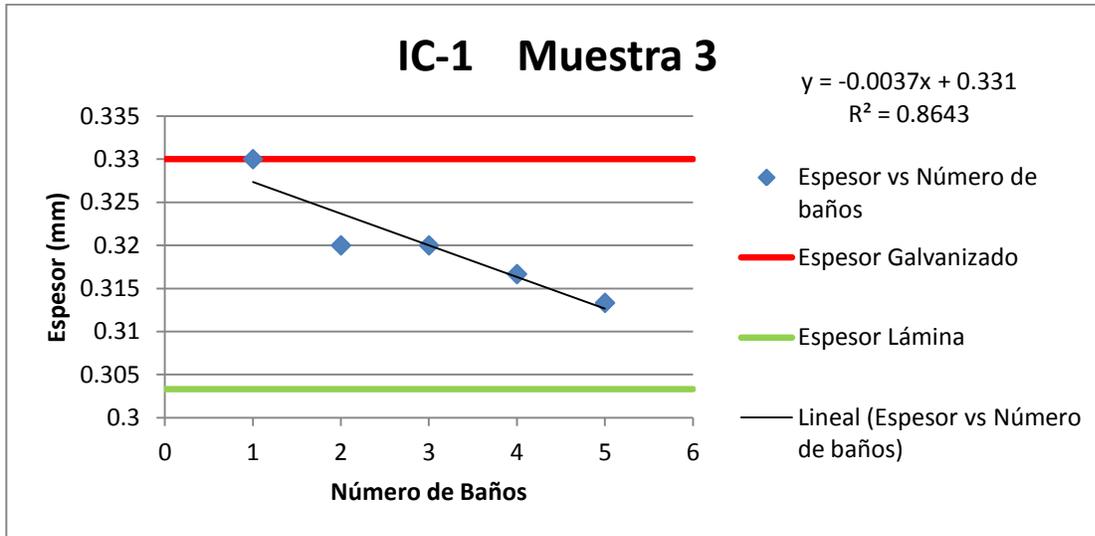
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-1

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,32	0,32	0,35	0,3300	0,0173
<b>1</b>	0,32	0,32	0,35	0,3300	0,0173
<b>2</b>	0,31	0,31	0,34	0,3200	0,0173
<b>3</b>	0,31	0,31	0,34	0,3200	0,0173
<b>4</b>	0,31	0,31	0,33	0,3167	0,0115
<b>5</b>	0,31	0,31	0,32	0,3133	0,0058
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,31	0,3033	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-1



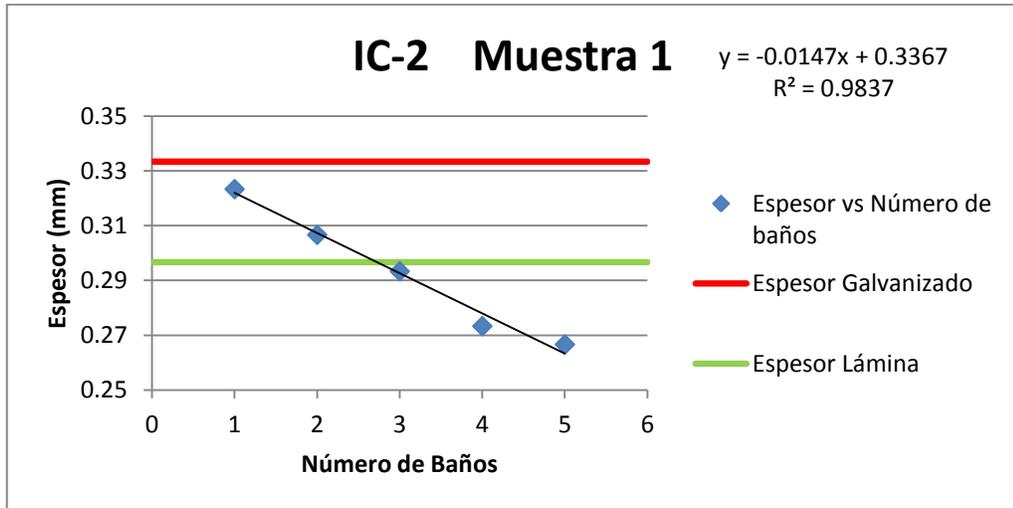
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-2

Número de baños	Especor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,34	0,33	0,33	0,3333	0,0058
<b>1</b>	0,32	0,32	0,33	0,3233	0,0058
<b>2</b>	0,30	0,31	0,31	0,3067	0,0058
<b>3</b>	0,29	0,30	0,29	0,2933	0,0058
<b>4</b>	0,27	0,28	0,27	0,2733	0,0058
<b>5</b>	0,26	0,27	0,27	0,2667	0,0058
<b>Final</b>	0,29	0,30	0,30	0,2967	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-2



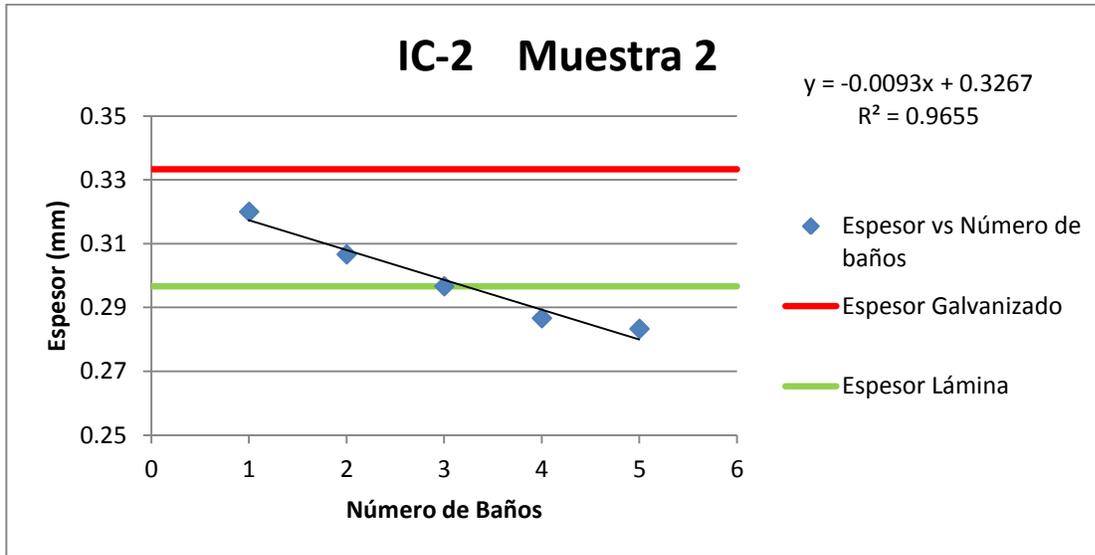
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-2

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,33	0,34	0,33	0,3333	0,0058
<b>1</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>2</b>	0,31	0,31	0,30	0,3067	0,0058
<b>3</b>	0,30	0,29	0,30	0,2967	0,0058
<b>4</b>	0,29	0,28	0,29	0,2867	0,0058
<b>5</b>	0,28	0,28	0,29	0,2833	0,0058
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,29	0,2967	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-2



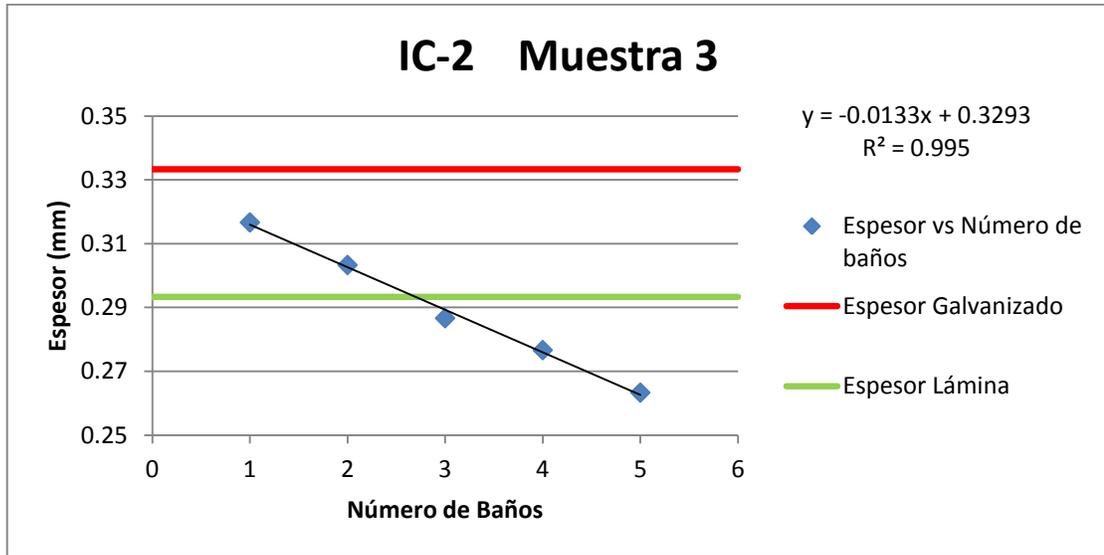
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-2

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,34	0,33	0,33	0,3333	0,0058
<b>1</b>	0,31	0,32	0,32	0,3167	0,0058
<b>2</b>	0,29	0,31	0,31	0,3033	0,0115
<b>3</b>	0,28	0,29	0,29	0,2867	0,0058
<b>4</b>	0,27	0,28	0,28	0,2767	0,0058
<b>5</b>	0,27	0,26	0,26	0,2633	0,0058
<b>Final</b>	0,29	0,29	0,30	0,2933	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-2



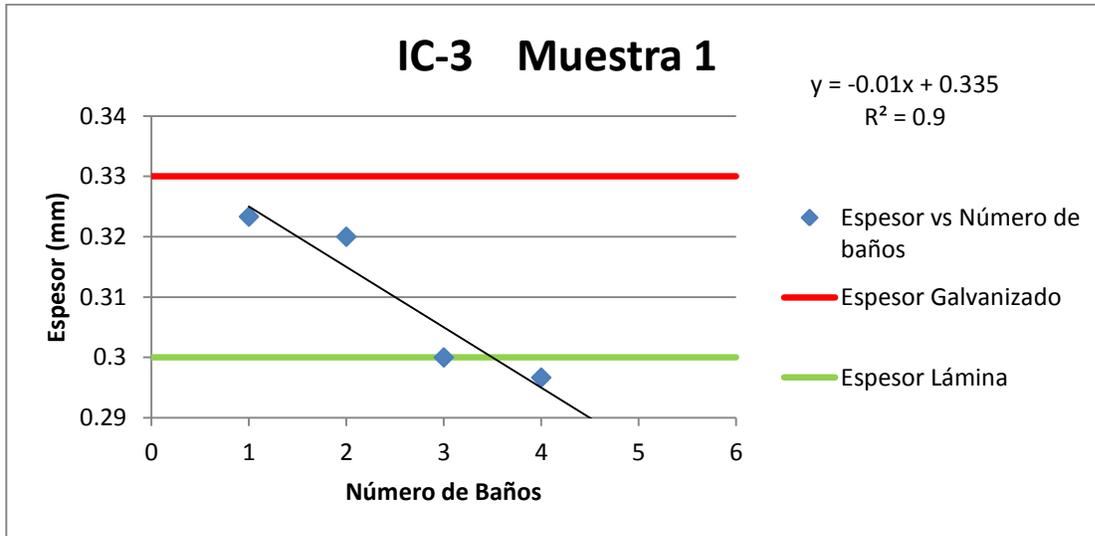
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-3

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,33	0,33	0,33	0,3300	0,0000
<b>1</b>	0,32	0,32	0,33	0,3233	0,0058
<b>2</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>3</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>4</b>	0,29	0,30	0,30	0,2966	0,0058
<b>5</b>	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-3



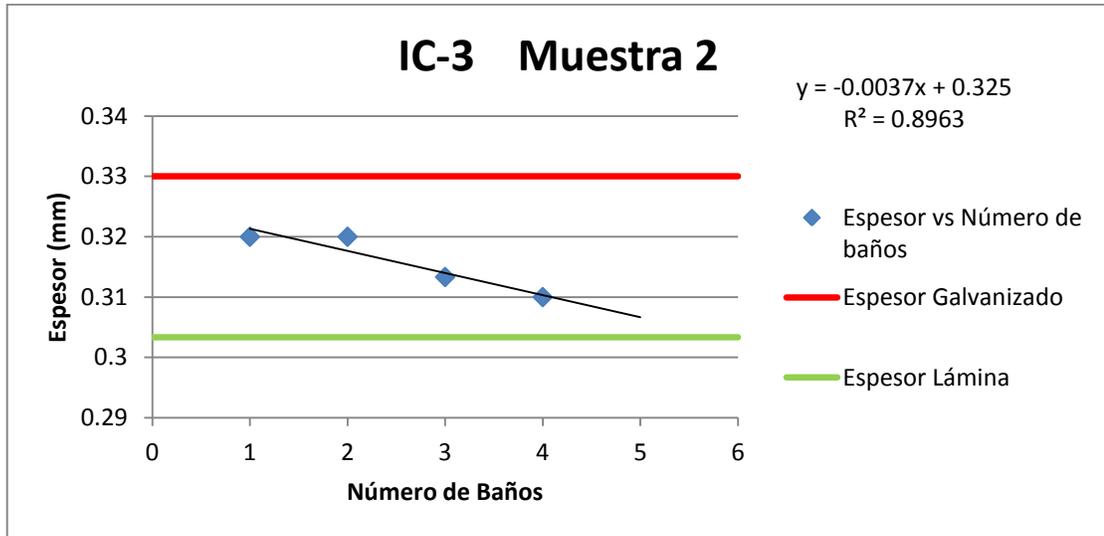
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-3

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,33	0,33	0,33	0,3300	0,0000
<b>1</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>2</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>3</b>	0,31	0,31	0,32	0,3133	0,0058
<b>4</b>	0,31	0,31	0,31	0,3100	0,0000
<b>5</b>	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,0000
<b>Final</b>	0,30	0,31	0,30	0,3033	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-3



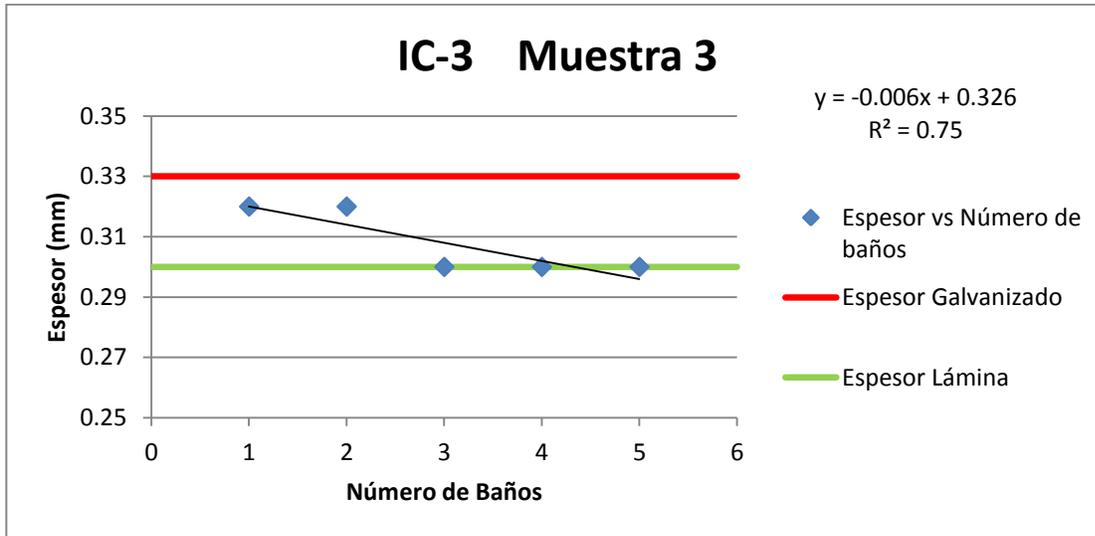
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-3

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,33	0,33	0,33	0,3300	0,0000
<b>1</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>2</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>3</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>4</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>5</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-3



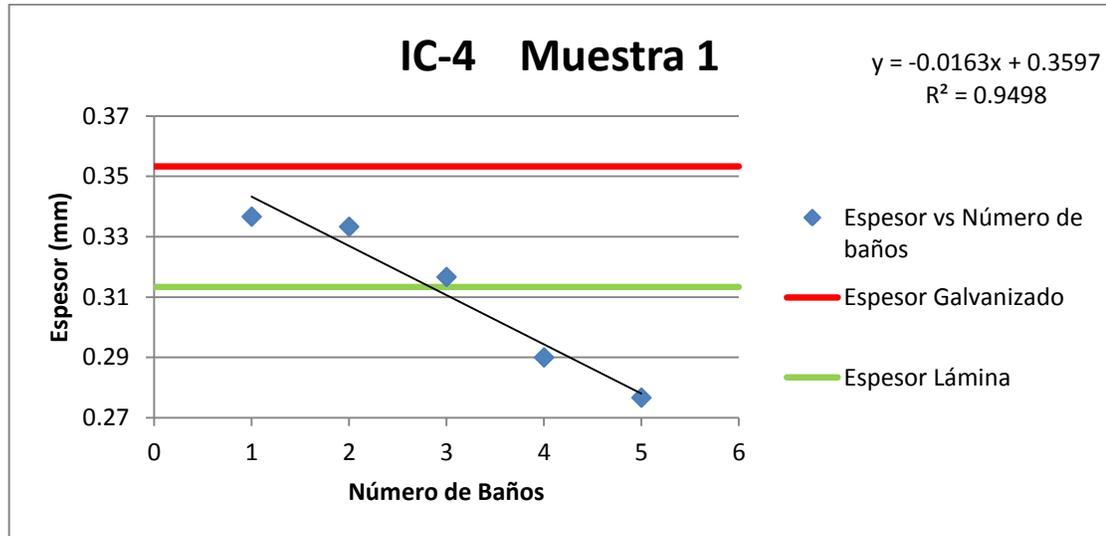
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-4

Número de baños	Espeor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,35	0,36	0,35	0,3533	0,0058
<b>1</b>	0,33	0,34	0,34	0,3367	0,0058
<b>2</b>	0,33	0,33	0,34	0,3333	0,0058
<b>3</b>	0,31	0,32	0,32	0,3167	0,0058
<b>4</b>	0,29	0,29	0,29	0,2900	0,0000
<b>5</b>	0,28	0,27	0,28	0,2767	0,0058
<b>Final</b>	0,31	0,32	0,31	0,3133	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-4



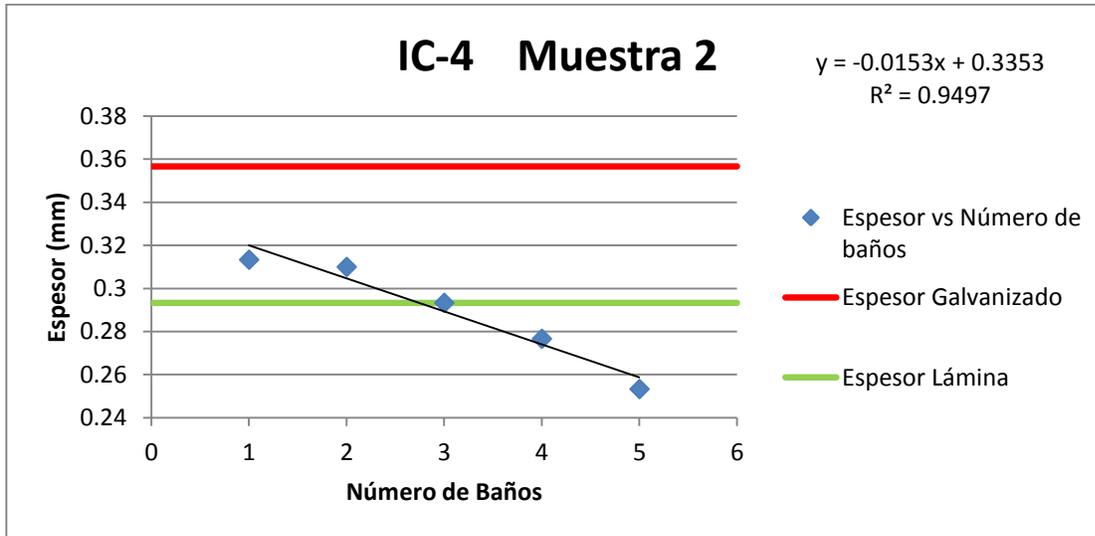
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-4

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,35	0,36	0,36	0,3567	0,0058
<b>1</b>	0,32	0,31	0,31	0,3133	0,0058
<b>2</b>	0,32	0,31	0,30	0,3100	0,0100
<b>3</b>	0,30	0,29	0,29	0,2933	0,0058
<b>4</b>	0,28	0,27	0,28	0,2767	0,0058
<b>5</b>	0,26	0,24	0,26	0,2533	0,0115
<b>Final</b>	0,30	0,29	0,29	0,2933	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-4



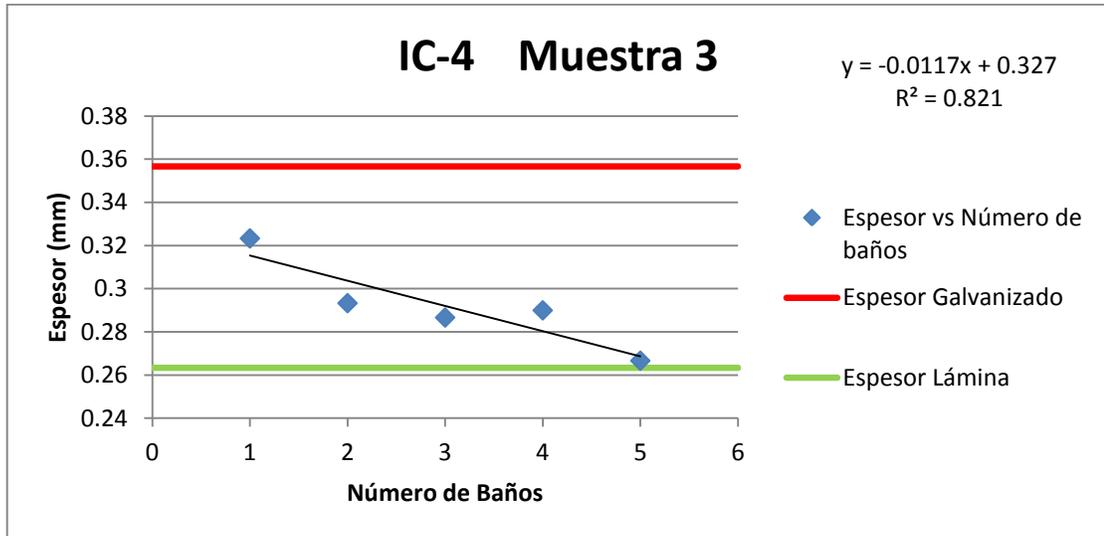
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-4

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,36	0,34	0,37	0,3567	0,0153
<b>1</b>	0,32	0,33	0,32	0,3233	0,0058
<b>2</b>	0,28	0,30	0,30	0,2933	0,0115
<b>3</b>	0,29	0,28	0,29	0,2867	0,0058
<b>4</b>	0,29	0,29	0,29	0,2900	0,0000
<b>5</b>	0,27	0,27	0,26	0,2667	0,0058
<b>Final</b>	0,27	0,26	0,26	0,2633	0,0058

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-4



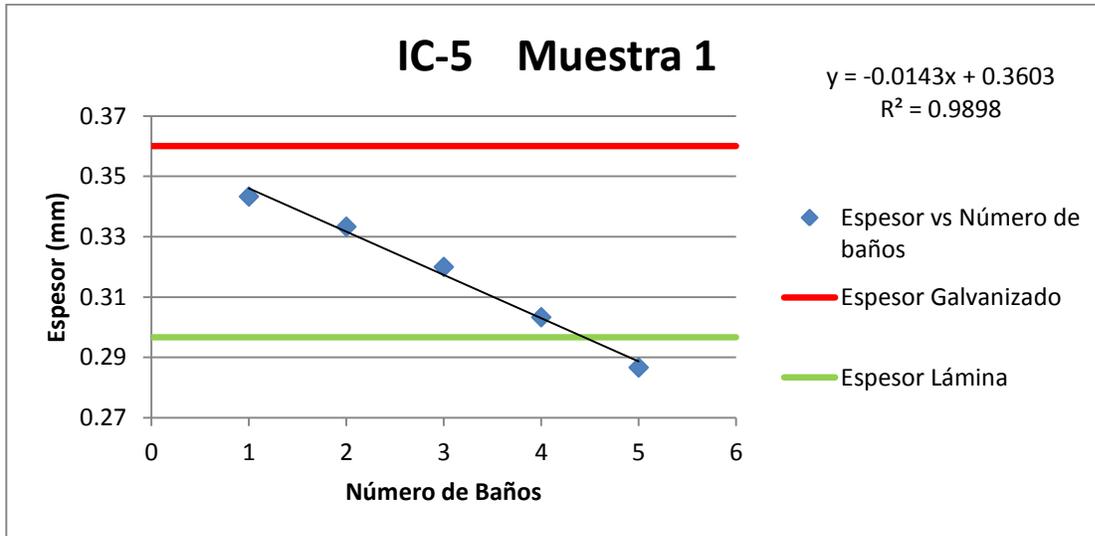
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-5

Número de baños	Especor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,36	0,37	0,35	0,3600	0,0100
<b>1</b>	0,35	0,34	0,34	0,3433	0,0057
<b>2</b>	0,34	0,33	0,33	0,3333	0,0057
<b>3</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>4</b>	0,31	0,30	0,30	0,3033	0,0058
<b>5</b>	0,29	0,28	0,29	0,2866	0,0057
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,29	0,2966	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-5



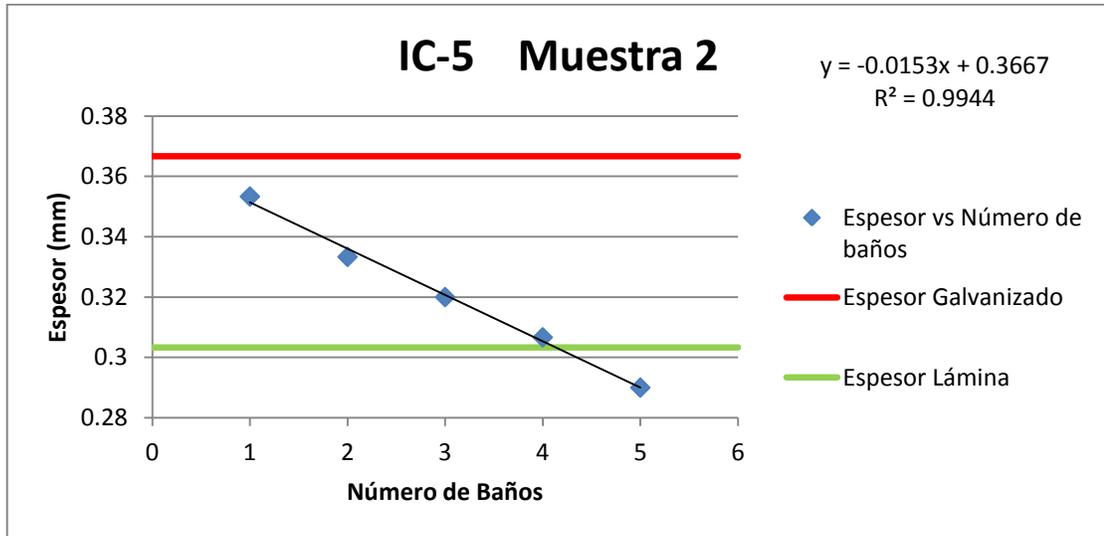
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-5

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,37	0,37	0,36	0,3666	0,0057
<b>1</b>	0,36	0,35	0,35	0,3533	0,0057
<b>2</b>	0,34	0,33	0,33	0,3333	0,0057
<b>3</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>4</b>	0,31	0,31	0,30	0,3066	0,0057
<b>5</b>	0,29	0,29	0,29	0,2900	0,0000
<b>Final</b>	0,30	0,31	0,30	0,3033	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-5



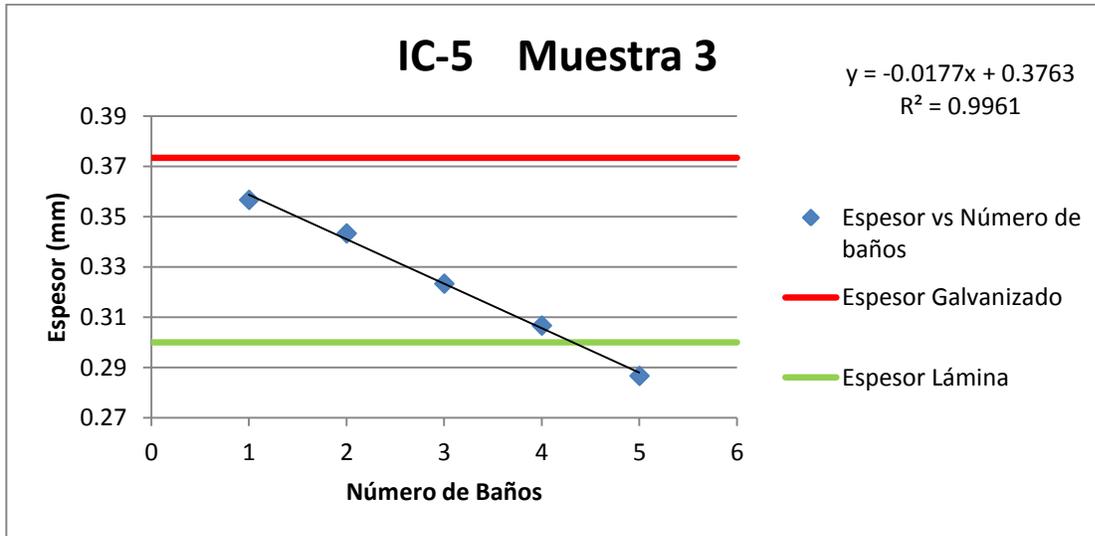
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-5

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,37	0,38	0,37	0,3733	0,0057
<b>1</b>	0,36	0,36	0,35	0,3566	0,0057
<b>2</b>	0,34	0,35	0,34	0,3433	0,0057
<b>3</b>	0,32	0,33	0,32	0,3233	0,0057
<b>4</b>	0,31	0,30	0,31	0,3066	0,0057
<b>5</b>	0,29	0,28	0,29	0,2866	0,0057
<b>Final</b>	0,31	0,30	0,29	0,3000	0,0100

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-5



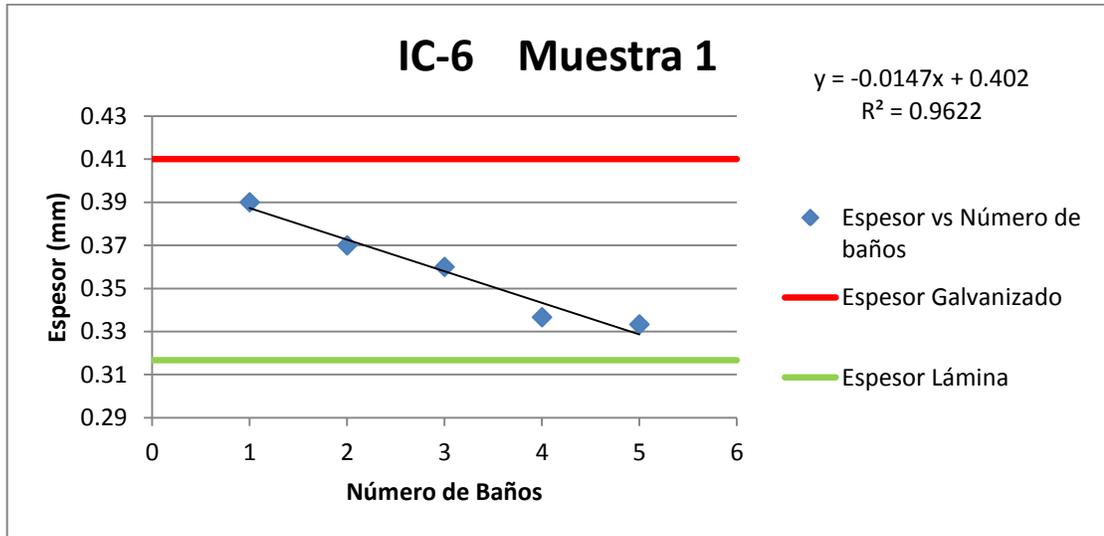
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-6

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,41	0,43	0,39	0,4100	0,0200
<b>1</b>	0,40	0,40	0,37	0,3900	0,0173
<b>2</b>	0,38	0,38	0,35	0,3700	0,0173
<b>3</b>	0,37	0,36	0,35	0,3600	0,0100
<b>4</b>	0,35	0,33	0,33	0,3366	0,0115
<b>5</b>	0,34	0,33	0,33	0,3333	0,0057
<b>Final</b>	0,31	0,33	0,31	0,3166	0,0115

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-6



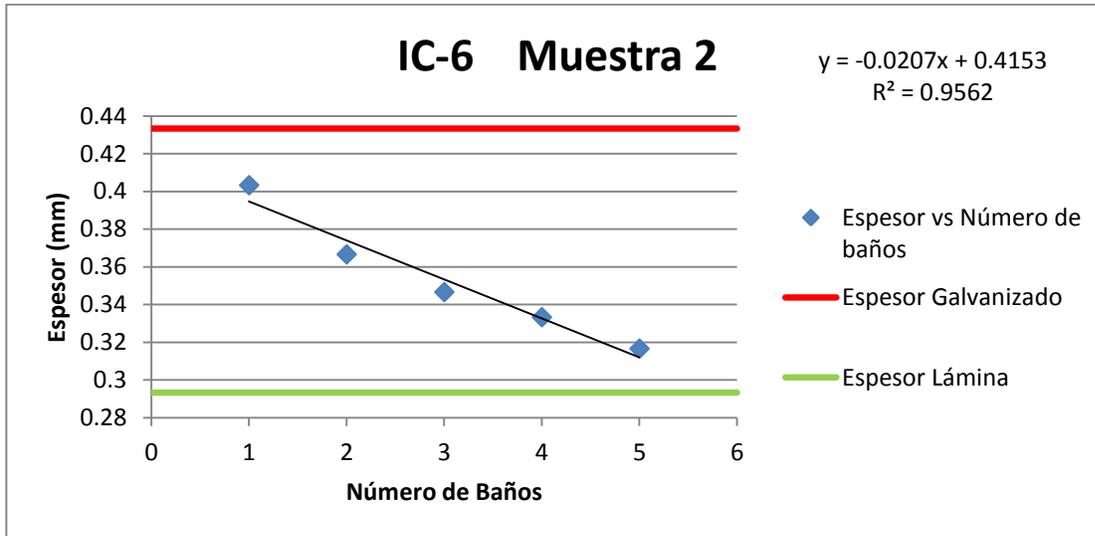
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-6

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,41	0,44	0,45	0,4333	0,0208
<b>1</b>	0,37	0,42	0,42	0,4033	0,0288
<b>2</b>	0,37	0,36	0,37	0,3667	0,0057
<b>3</b>	0,35	0,34	0,35	0,3466	0,0057
<b>4</b>	0,33	0,33	0,34	0,3333	0,0057
<b>5</b>	0,31	0,32	0,32	0,3166	0,0057
<b>Final</b>	0,29	0,30	0,29	0,2933	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-6



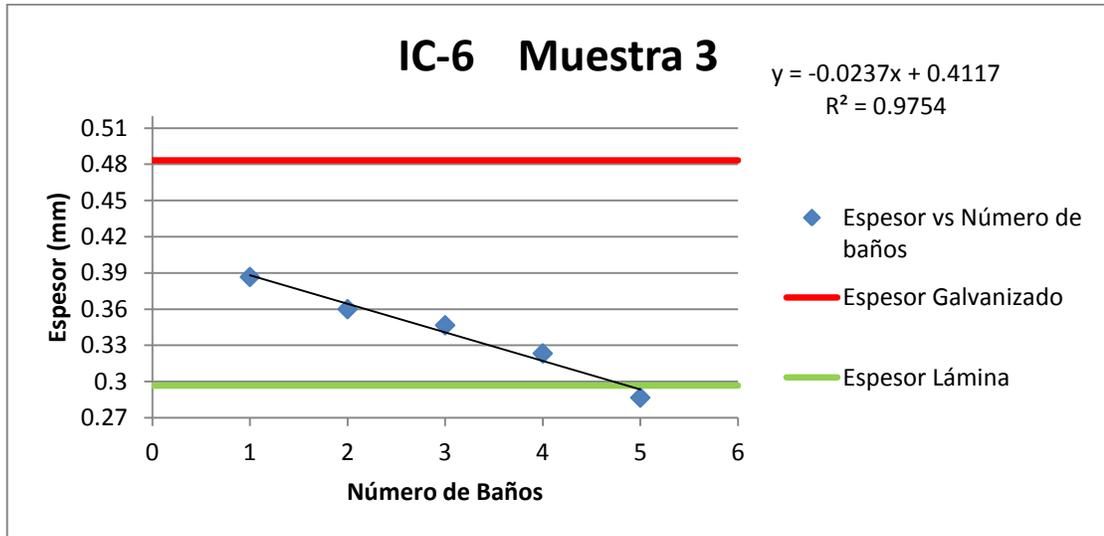
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para Muestra 3 de IC-6

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación Estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,48	0,49	0,48	0,4833	0,0057
<b>1</b>	0,36	0,40	0,40	0,3866	0,0230
<b>2</b>	0,34	0,38	0,36	0,3600	0,0200
<b>3</b>	0,33	0,36	0,35	0,3466	0,0152
<b>4</b>	0,31	0,33	0,33	0,3233	0,0115
<b>5</b>	0,29	0,28	0,29	0,2866	0,0057
<b>Final</b>	0,29	0,30	0,30	0,2966	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-6



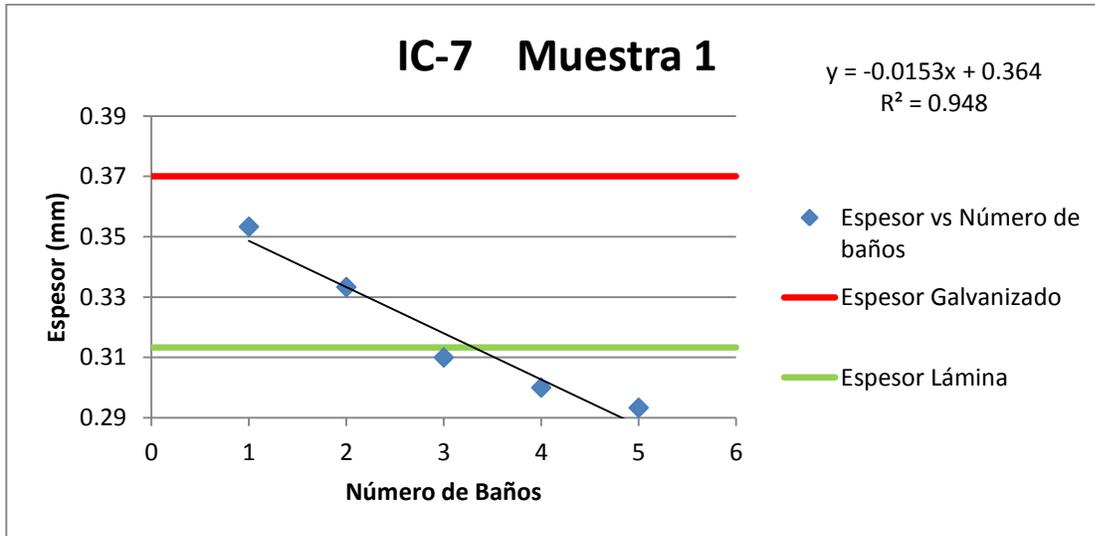
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-7

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,36	0,38	0,37	0,3700	0,0100
<b>1</b>	0,35	0,35	0,36	0,3533	0,0057
<b>2</b>	0,33	0,33	0,34	0,3333	0,0057
<b>3</b>	0,31	0,31	0,31	0,3100	0,0000
<b>4</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>5</b>	0,29	0,29	0,30	0,2933	0,0057
<b>Final</b>	0,31	0,32	0,31	0,3133	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-7



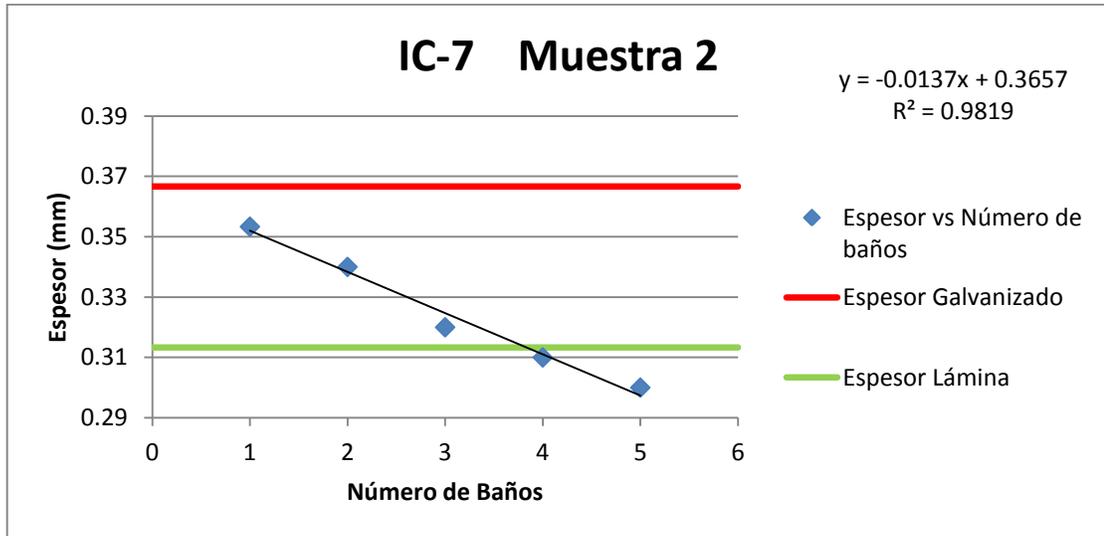
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-7

Número de baños	Especor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,37	0,37	0,36	0,3666	0,0057
<b>1</b>	0,36	0,36	0,34	0,3533	0,0115
<b>2</b>	0,35	0,34	0,33	0,3400	0,0100
<b>3</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>4</b>	0,31	0,31	0,31	0,3100	0,0000
<b>5</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000
<b>Final</b>	0,32	0,31	0,31	0,3133	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-7



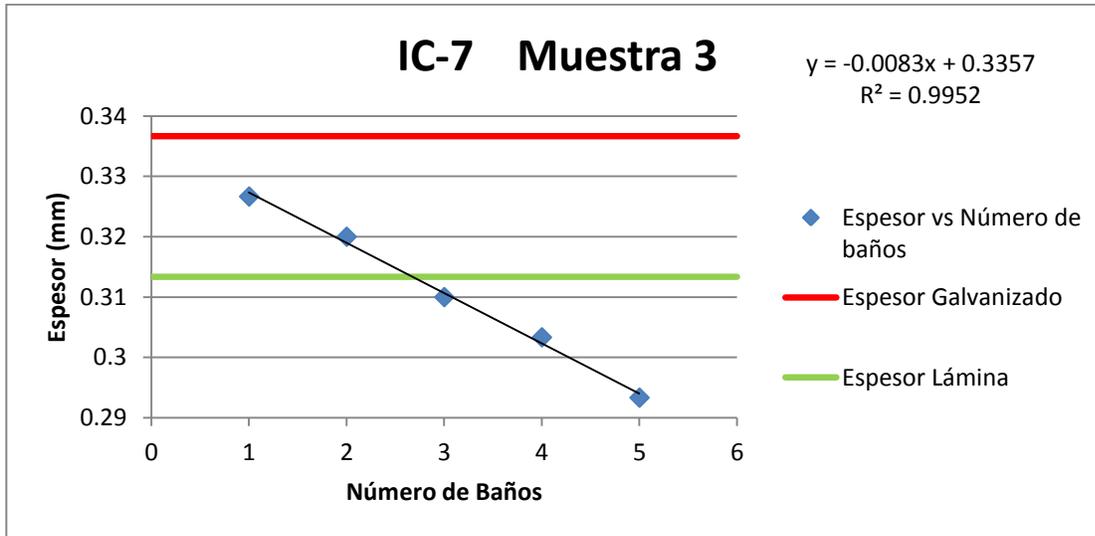
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-7

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,34	0,34	0,33	0,3366	0,0057
<b>1</b>	0,33	0,33	0,32	0,3266	0,0057
<b>2</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>3</b>	0,31	0,31	0,31	0,3100	0,0000
<b>4</b>	0,30	0,30	0,31	0,3033	0,0057
<b>5</b>	0,29	0,30	0,29	0,2933	0,0057
<b>Final</b>	0,32	0,31	0,31	0,3133	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-7



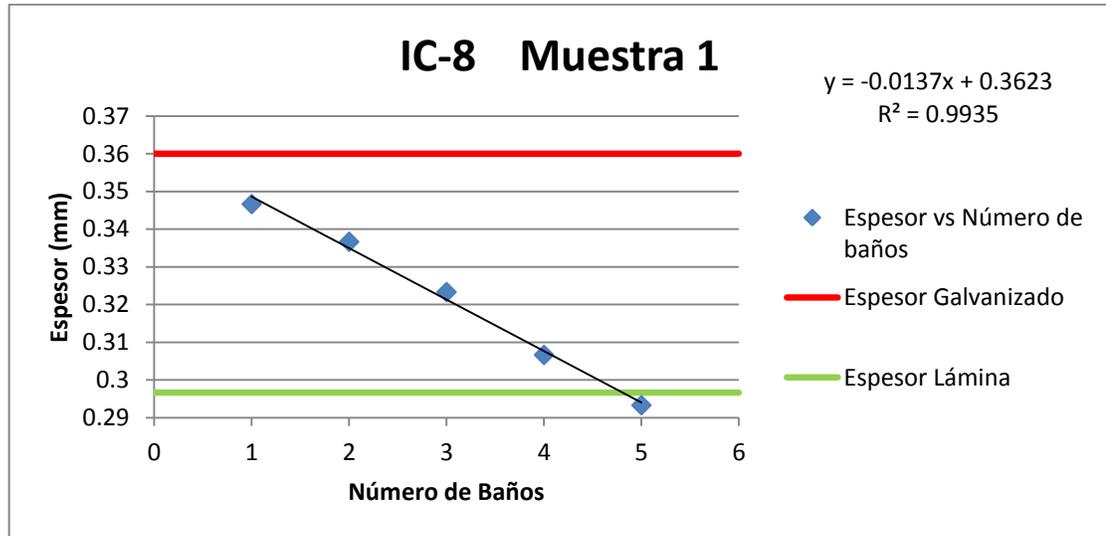
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 1 de IC-8

Número de baños	Especor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,36	0,35	0,37	0,3600	0,0100
<b>1</b>	0,35	0,34	0,35	0,3466	0,0057
<b>2</b>	0,34	0,33	0,34	0,3366	0,0057
<b>3</b>	0,33	0,32	0,32	0,3233	0,0057
<b>4</b>	0,31	0,30	0,31	0,3066	0,0057
<b>5</b>	0,29	0,30	0,29	0,2933	0,0057
<b>Final</b>	0,30	0,29	0,30	0,2966	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 1 de IC-8



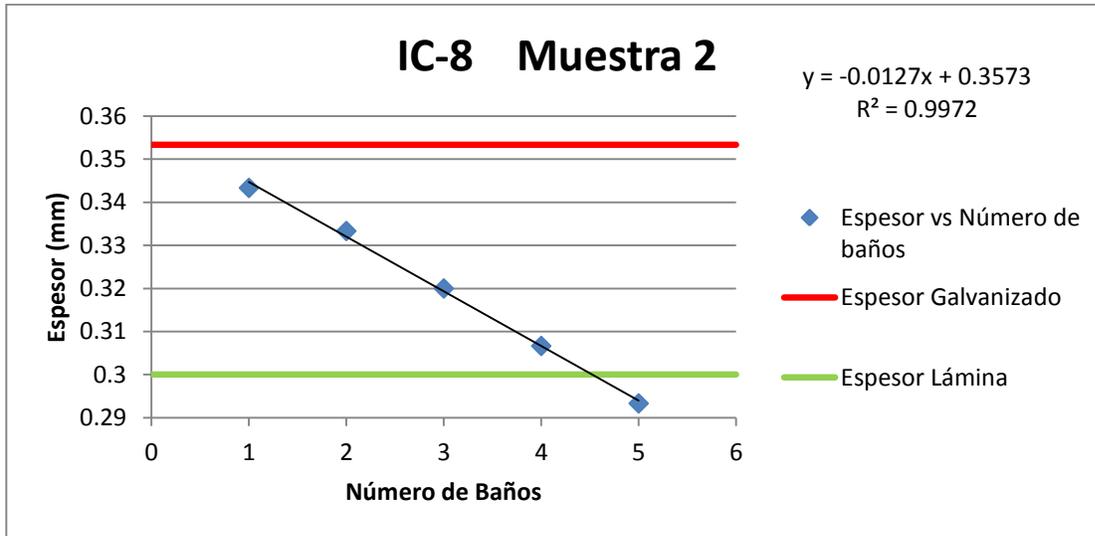
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 2 de IC-8

Número de baños	Espesor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,35	0,36	0,35	0,3533	0,0057
<b>1</b>	0,34	0,35	0,34	0,3433	0,0057
<b>2</b>	0,33	0,34	0,33	0,3333	0,0057
<b>3</b>	0,32	0,32	0,32	0,3200	0,0000
<b>4</b>	0,31	0,30	0,31	0,3066	0,0057
<b>5</b>	0,29	0,29	0,30	0,2933	0,0057
<b>Final</b>	0,30	0,30	0,30	0,3000	0,0000

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 2 de IC-8



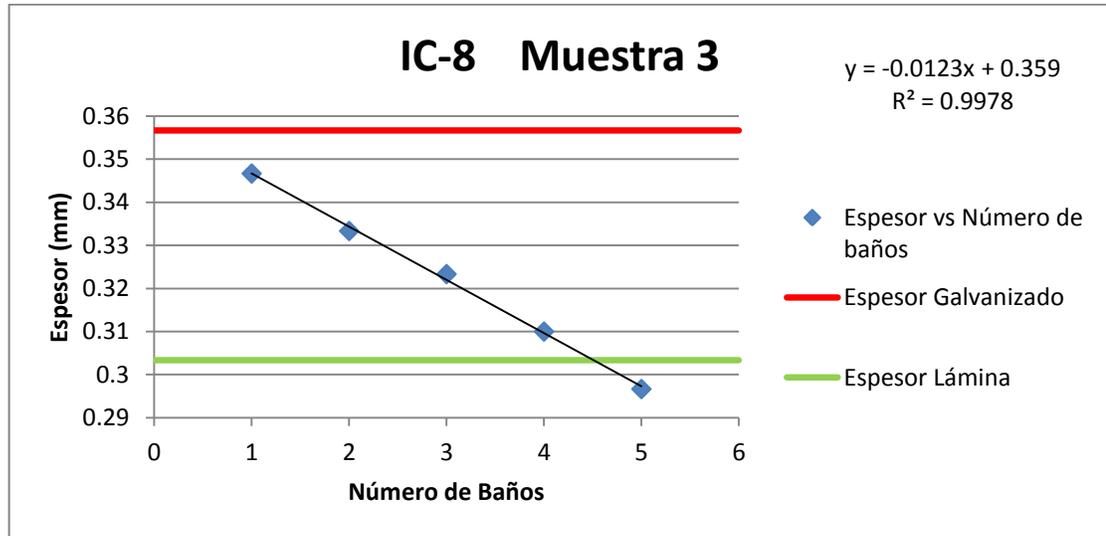
Fuente: elaboración propia.

### Promedio de espesor para muestra 3 de IC-8

Número de baños	Especor (mm)			Promedio	Desviación estándar
	Medidas				
<b>Inicial</b>	0,36	0,36	0,35	0,3566	0,0057
<b>1</b>	0,35	0,35	0,34	0,3466	0,0057
<b>2</b>	0,33	0,34	0,33	0,3333	0,0057
<b>3</b>	0,32	0,33	0,32	0,3233	0,0057
<b>4</b>	0,31	0,31	0,31	0,3100	0,0000
<b>5</b>	0,30	0,29	0,30	0,2966	0,0057
<b>Final</b>	0,31	0,30	0,30	0,3033	0,0057

Fuente: elaboración propia.

### Espesor vs número de baños para muestra 3 de IC-8

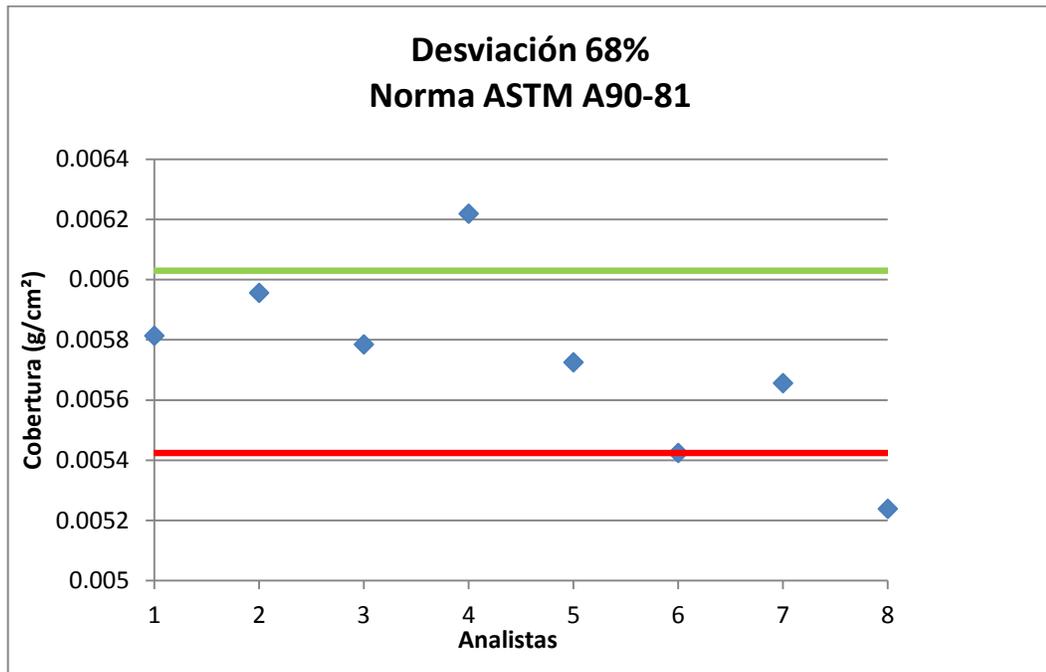


Fuente: elaboración propia.



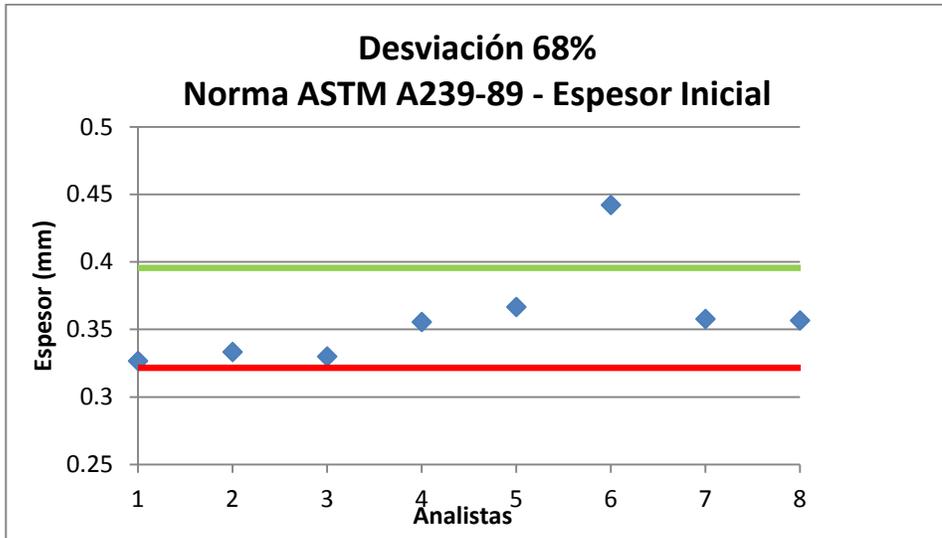
## APÉNDICE D: Diagramas de Schewart

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM A90-81



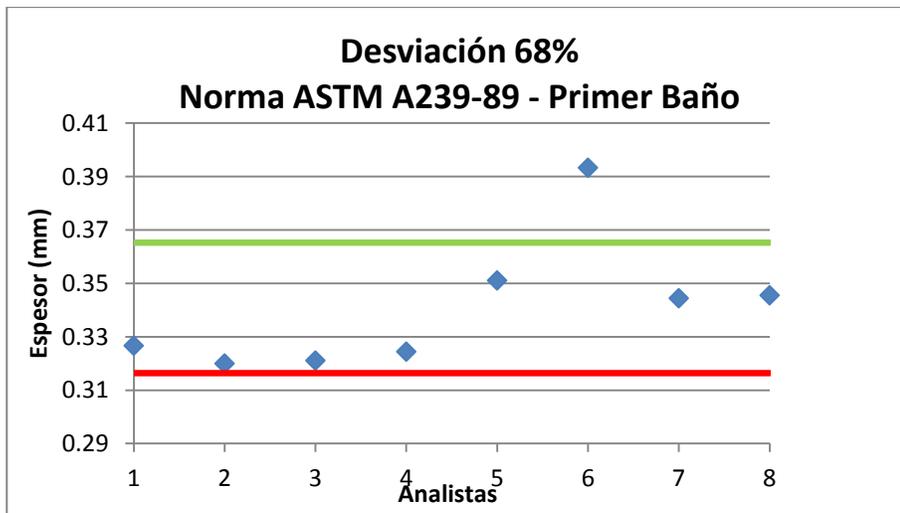
Fuente: elaboración propia.

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM A239-89, espesor Inicial



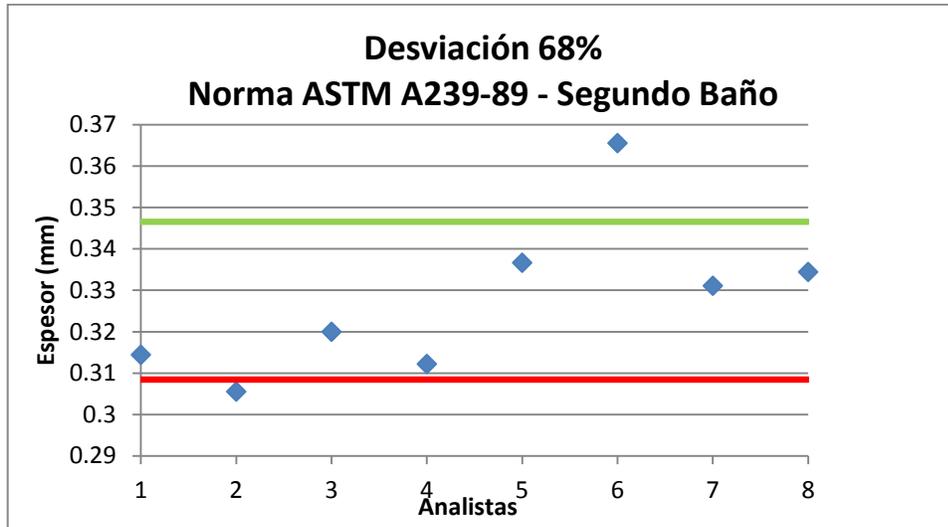
Fuente: elaboración propia.

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM 239-89, primer baño



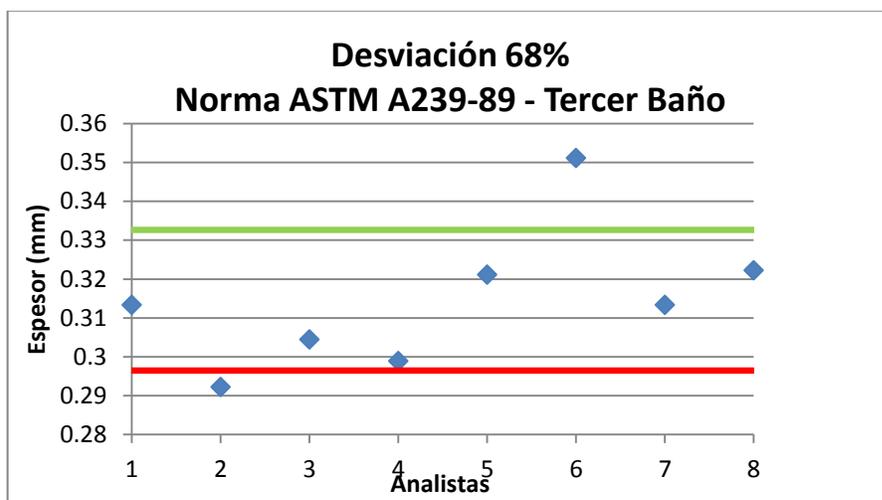
Fuente: elaboración propia.

**Diagrama de Schewart para Norma ASTM A239-89, segundo baño**



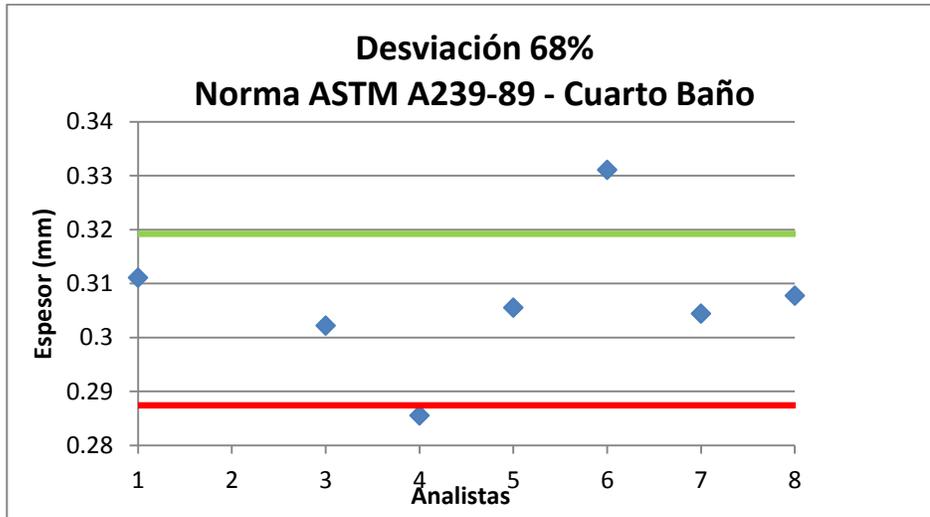
Fuente: elaboración propia.

**Diagrama de Schewart para Norma ASTM 239-89, tercer baño**



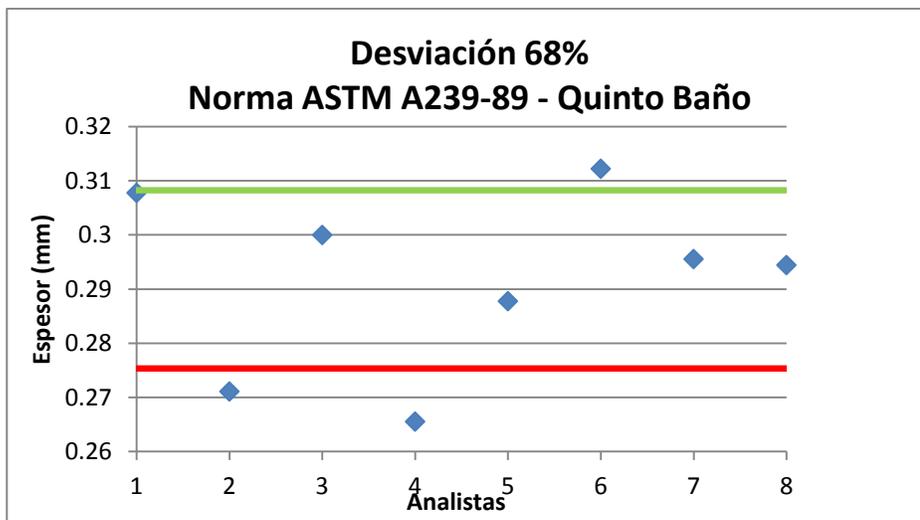
Fuente: elaboración propia.

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM A239-89, cuarto baño



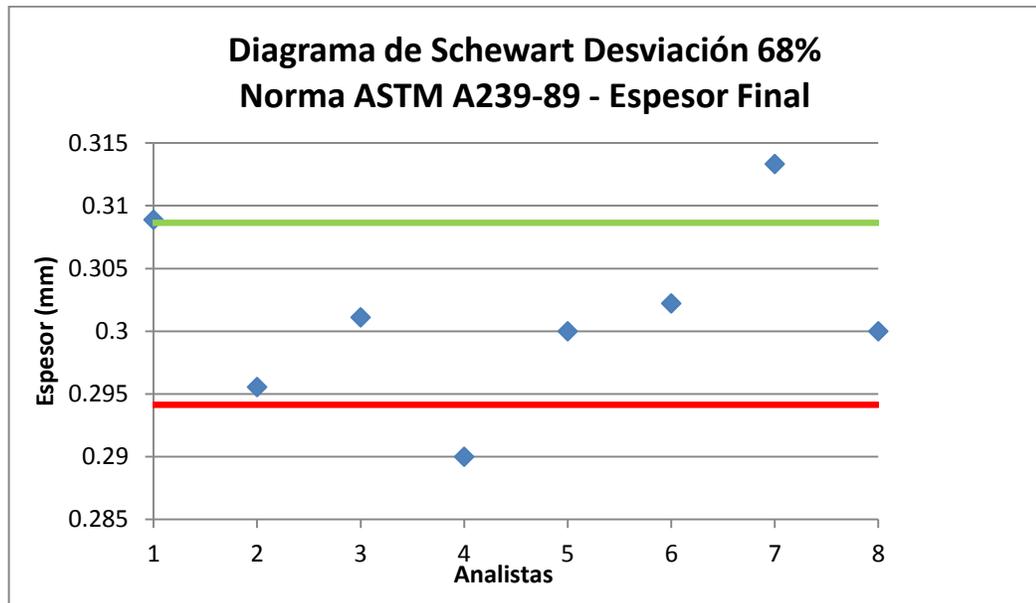
Fuente: elaboración propia.

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM 239-89, quinto baño



Fuente: elaboración propia.

### Diagrama de Schewart para Norma ASTM 239-89, espesor final



Fuente: elaboración propia.

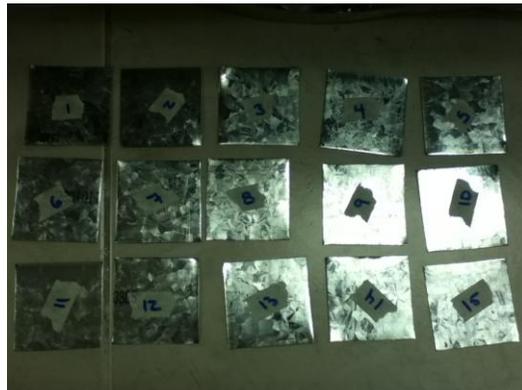


## Apéndice E: Imágenes de los ensayos

### Equipo para medición de longitud y corte



### Muestras antes del decapado



## Vernier Mitutoyo



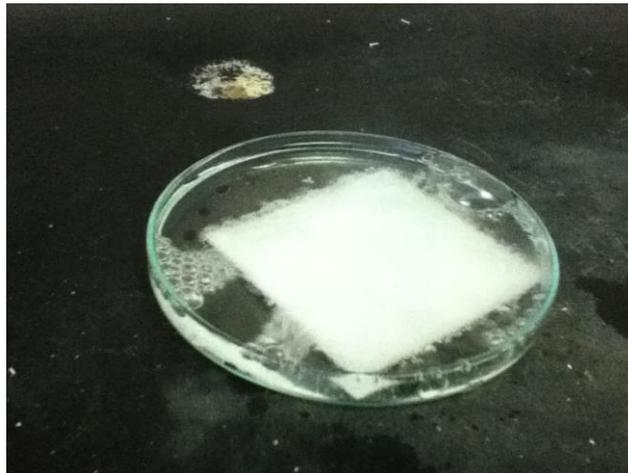
## Ajuste de cero del Vernier



### Medición de espesor



### Decapado de muestra con ácido clorhídrico



**Comparación de muestras después del decapado**



**Muestras identificadas**



## Toma de datos



## Pesaje de muestras



### Lavado de muestras



### Muestra antes de los baños



**Muestra después del segundo baño**

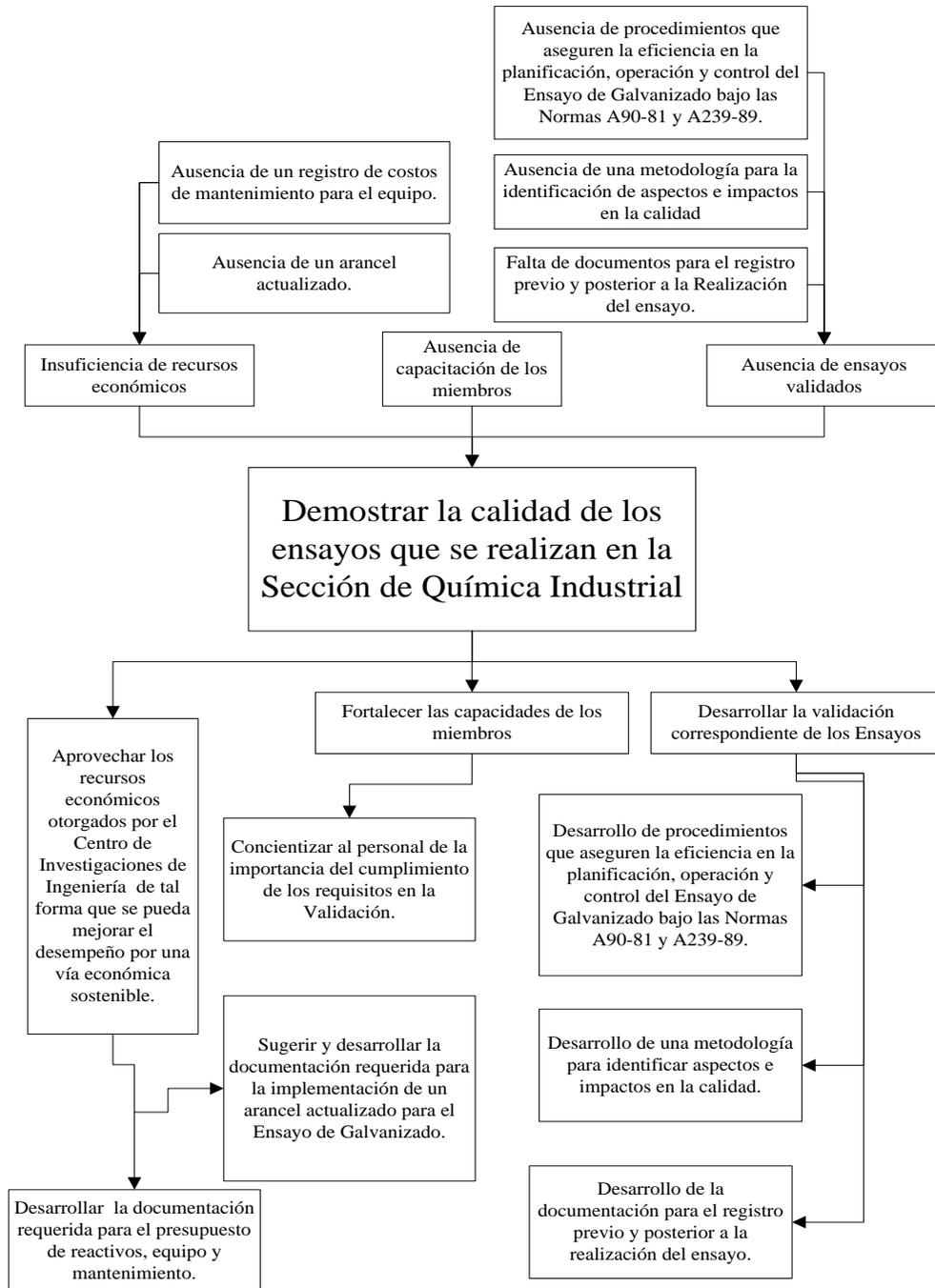


**Muestra en su punto final**





## Apéndice F: Árbol de problemas





## Apéndice G: Tabla de requisitos académicos

