

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PASIVACIÓN, EN LA FABRICACIÓN DE ACERO GALVANIZADO UTILIZANDO DISTINTAS FORMULACIONES, PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO"

TESIS DE GRADO

SILVIA MARÍA CASTILLO LANZA
CARNET 10192-12

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, AGOSTO DE 2017
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PASIVACIÓN, EN LA FABRICACIÓN DE ACERO GALVANIZADO UTILIZANDO DISTINTAS FORMULACIONES, PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO"

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA

POR
SILVIA MARÍA CASTILLO LANZA

PREVIO A CONFERÍRSELE
EL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, AGOSTO DE 2017
CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.

VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO

VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO

VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.

VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS

SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

DECANA: MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA DE ZUNIGA

SECRETARIA: MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN

DIRECTOR DE CARRERA: DR. MARIO RENE SANTIZO CALDERON

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN
ING. JUAN CARLOS GARCÍA CERÓN

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. JOSE ANTONIO ROSAL CHICAS
MGTR. MIRIAM ESTELA CHAVEZ RAMIREZ
ING. JULIO CÉSAR MONROY LINARES

CARTA DE APROBACIÓN DEL ASESOR

Guatemala, 16 de junio de 2017

Doctor
Mario René Santizo Calderón
Director Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Doctor Santizo:

Por este medio me es grato saludarle y desearle éxitos en sus labores diarias.

El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: **"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PASIVACIÓN, EN LA FABRICACIÓN DE ACERO GALVANIZADO, UTILIZANDO DISTINTAS FORMULACIONES, PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO"** de la estudiante **Silvia María Castillo Lanza** quien se identifica con el número de carné **1019212**, de la carrera de Ingeniería Química Industrial. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy como aprobado dicho trabajo.

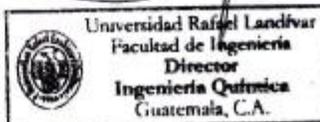
Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente.



Ing. Juan Carlos García Cerón

Asesor



CARTA DE AUTORIZACIÓN DE GRABACIÓN ELECTRÓNICA DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA
No. 0268-2017

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante SILVIA MARÍA CASTILLO LANZA, Carnet 10192-12 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 02461-2017 de fecha 19 de julio de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

"EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PASIVACIÓN, EN LA FABRICACIÓN DE ACERO GALVANIZADO UTILIZANDO DISTINTAS FORMULACIONES, PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO"

Previo a conferírsele el título de INGENIERA QUÍMICA INDUSTRIAL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 16 días del mes de agosto del año 2017.



MGTR. MARYA ALEJANDRA ORTIZ PATZAN, SECRETARIA
INGENIERÍA
Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A Dios y la Virgen María	Por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida, llena de bendiciones.
A mi mamá	Por todo su esfuerzo para darme la mejor educación, este logro también es tuyo.
A mi hermano	Por acompañarme en cada etapa de mi vida y darme la motivación para alcanzar mis metas.
A mis abuelitos	Por ser mi ejemplo de seres humanos, en quienes pienso para seguir adelante.
A mi familia	Por apoyarme en todo momento, son lo más valioso de mi vida.
A mi novio	Por ser mi apoyo y demostrarme su amor incondicional.
A mis amigos	Por acompañarme en estos años de estudio, y darme el cariño y la motivación que siempre necesité.
A mis compañeros de trabajo	Por compartirme sus conocimientos y apoyo incondicional durante los últimos años de estudio.

DEDICATORIA

A Dios y a la Virgen María

Por demostrarme su amor y ser luz y guía durante toda mi vida.

A mi hermano

Carlos Andrés, por hacerme sentir su cariño y motivarme a seguir mis sueños.

A mi abuelita

Mery, por acompañarme en cada etapa, brindándome su amor incondicional y sus cuidados que han sido el motor de mi vida.

A mi papito

Paco, por darme su ejemplo de superación, ser mi ángel guardián y celebrar este logro conmigo desde el cielo.

A mi novio

Estuardo, por ser mi compañero de vida, mi fuerza, mi apoyo, mi motivación y mi inspiración a ser mejor persona cada día.

En especial, este trabajo y logro se lo dedico a mi mamá, Loren, por ser mi ejemplo de persona, de mujer, de profesional; por formarme como la persona que soy ahora y compartir conmigo todos los triunfos y fracasos. Nada de esto hubiera sido posible sin su apoyo.

RESUMEN EJECUTIVO

EVALUACIÓN DEL PROCESO DE PASIVACIÓN, EN LA FABRICACIÓN DE ACERO GALVANIZADO, UTILIZANDO DISTINTAS FORMULACIONES, PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DEL PRODUCTO TERMINADO

SILVIA MARÍA CASTILLO LANZA

INGENIERÍA QUÍMICA INDUSTRIAL

El presente trabajo de graduación se realizó con el objetivo de evaluar un proceso de pasivación de acero galvanizado utilizando tres distintas concentraciones de ácido pasivante, para determinar la resistencia a la corrosión del producto terminado con cada una de ellas y establecer la que tenga el mejor desempeño.

Para ello, se analizaron las etapas del proceso de pasivación para determinar aquellas que tuvieran incidencia directa sobre la resistencia a la corrosión del producto terminado. Posteriormente se utilizaron tres concentraciones de ácido pasivante en el producto final y se determinó la deposición de cada una de ellas en el acero galvanizado para evaluar la dependencia de este con el comportamiento del producto. Para evaluar el comportamiento del acero galvanizado ante condiciones atmosféricas y de almacenamiento se realizó un ensayo de apilamiento húmedo durante 28 días, y para evaluar la resistencia ante condiciones aceleradas se realizó un ensayo de niebla salina durante 170 horas. Luego de evaluar el óxido presentado en las muestras utilizadas se determinó que la concentración que presenta un mayor aporte en la resistencia a la corrosión del producto terminado fue la definida con un rango de 15 – 25%.

DESCRIPTORES: acero, corrosión, deposición, galvanizado, oxidación, pasivación, solución pasivante.

ÍNDICE GENERAL

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Lo escrito sobre el tema	2
1.2. Resumen crítico del marco teórico	6
1.2.1. Evaluación	6
1.2.2. El acero.....	6
1.2.3. Metales	6
1.2.4. Oxígeno	7
1.2.5. Oxidación.....	8
1.2.6. Galvanización	11
1.2.7. Protección de barrera con zinc	11
1.2.8. Protección catódica con zinc.....	11
1.2.9. Óxido blanco.....	14
1.2.10. Corrosión	18
1.2.11. Procesos corrosivos.....	21
1.2.12. Velocidad de corrosión	21
1.2.13. Formas de corrosión	23
1.2.14. Proceso de formación de la corrosión.....	24
1.2.15. Pasivación	28
1.2.16. Ensayos de exposición a humedad	32
1.2.17. Ensayos de corrosión acelerada.....	33
1.2.18. Deposición de cromo en producto terminado	34
1.2.19. Espectrometría de absorción atómica.....	34
1.2.20. Diagrama causa – efecto	36
1.2.21. Terminología estadística	37
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	41
2.1. Objetivos	43
2.1.1. Objetivo general.....	43
2.1.2. Objetivos específicos	43

2.2.	Variables	44
2.2.1.	Variables independientes.....	44
2.2.2.	Variables dependientes	44
2.3.	Definición de las variables.....	45
2.3.1.	Variables independientes.....	45
2.3.2.	Variables dependientes	47
2.4.	Alcances y límites.....	48
2.4.1.	Alcances	48
2.4.2.	Límites	48
2.5.	Aporte.....	50
3.	MÉTODO	51
3.1.	Sujetos y unidades de análisis	52
3.1.1.	Sujeto.....	52
3.1.2.	Unidades de análisis.....	52
3.2.	Instrumentos.....	53
3.3.	Procedimiento	59
3.3.1.	Diagrama general	59
3.3.2.	Diagramas específicos.....	60
3.4.	Diseño y metodología estadística.....	69
3.4.1.	Diseño experimental	69
3.4.2.	Cálculo del tamaño de muestra	70
3.4.3.	Descripción de las unidades experimentales.....	72
3.4.4.	Variable respuesta	73
3.4.5.	Metodología de análisis	74
4.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	76
4.1.	Evaluación del proceso de pasivación de acero galvanizado.....	76
4.2.	Evaluación de calidad del producto terminado	78
4.3.	Ensayo de apilamiento húmedo	79
4.4.	Ensayo de niebla salina.....	83
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	88
6.	CONCLUSIONES	97

7. RECOMENDACIONES.....	98
8. REFERENCIAS	99
9. GLOSARIO Y ABREVIATURAS	106
9.1. Glosario	106
9.2. Abreviaturas	108
10. ANEXOS.....	109
10.1. ANEXO A: Condiciones de operación del presente estudio.....	109
10.2. ANEXO B: Tablas Mil Std 105E	110
10.3. ANEXO C: Evaluación de parámetros del proceso de pasivación	111
10.4. ANEXO D: Datos originales.....	114
10.5. ANEXO E: Datos calculados	127
10.6 ANEXO F: Tabla costos de ácido pasivante.....	135
10.7 ANEXO G: Tabla de constantes de gráficos de control.....	136
10.8 ANEXO H: Recopilación de imágenes	137
10.9 ANEXO I: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante A, expuesto a ensayo de apilamiento húmedo.	139
10.10 ANEXO J: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante B, expuesto a ensayo de niebla salina.	139
10.11 ANEXO K: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante C, expuesto a ensayo de apilamiento húmedo.	139
10.12 ANEXO L: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado sin ácido pasivante, expuesto a ensayo de niebla salina.	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No. 1 Reacción de formación de óxidos básicos	9
Figura No. 2 Reacción de oxidación de hierro (II)	9
Figura No. 3 Reacción de oxidación de hierro (III)	9
Figura No. 4 Esquema de distintos recubrimientos aplicados sobre el acero.	12
Figura No. 5 Serie galvánica	13
Figura No. 6 Reacción de formación de óxido de zinc.	15
Figura No. 7 Reacción de formación de hidróxido de zinc.	15
Figura No. 8 Diagrama de humedad atrapada entre superficies revestidas con zinc....	16
Figura No. 9 Reacción catódica de formación de óxido por almacenamiento.	16
Figura No. 10 Reacción anódica de formación de óxido por almacenamiento.	16
Figura No. 11 Reacción de hidratación de los iones de zinc.	16
Figura No. 12 Reacción de formación de hidróxido de zinc por almacenamiento.	16
Figura No. 13 Reacción de oxidación del hierro causada por la acción del oxígeno atmosférico.	19
Figura No. 14 Reacción de oxidación del hierro causada por la acción del azufre.	19
Figura No. 15 Diagrama de corrosión directa o atmosférica.	19
Figura No. 16 Diagrama de corrosión electroquímica o galvánica.	21
Figura No. 17 Diagrama de proceso de corrosión.	24
Figura No. 18 Reacción de oxidación del hierro metálico.	25
Figura No. 19 Reacción de reducción del oxígeno atmosférico a agua.	25
Figura No. 20 Reacción global de oxidación – reducción de hierro y oxígeno.	25
Figura No. 21 Potencial de la oxidación – reducción de hierro y oxígeno.	25
Figura No. 22 Reacción de oxidación del ión hierro (II)	25
Figura No. 23 Reacción de reducción del oxígeno disuelto en agua.	26
Figura No. 24 Reacción global de oxidación – reducción del ión hierro (II) y oxígeno. .	26
Figura No. 25 Reacción de desprotonación de las moléculas de agua.	26
Figura No. 26 Reacción global de corrosión de hierro.	26
Figura No. 27 Reacción de reducción de oxígeno en medio básico o neutro.	27
Figura No. 28 Reacción de oxidación de hierro en medio básico o neutro.	27

Figura No. 29 Reacción global oxidación – reducción de la reducción de oxígeno y oxidación de hierro.	27
Figura No. 30 Reacción formación de hidróxido de hierro (II) en medio básico o neutro.	27
Figura No. 31 Reacción de oxidación del hidróxido de hierro (II) en medio básico o neutro.	27
Figura No. 32 Reacción de formación de óxido de hierro (III) en medio básico o neutro.	27
Figura No. 33 Esquema de la protección del acero galvanizado formada por ácido pasivante y solvente sin color.	29
Figura No. 34 Esquema de la protección del acero galvanizado formada por ácido pasivante y solvente con color.	29
Figura No. 35 Reacción de reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.	30
Figura No. 36 Reacción de disolución de zinc en ácido.	30
Figura No. 37 Reacción redox de cromo en medio ácido.	30
Figura No. 38 Reacción de formación de la capa de óxido de cromo y zinc.	30
Figura No. 39 Diagrama causa – efecto	37
Figura No. 40 Ecuación desviación estándar	37
Figura No. 41 Ecuación para el cálculo del límite de control superior para el gráfico de datos individuales.	38
Figura No. 42 Ecuación para el cálculo del límite de control central para el gráfico de datos individuales.	38
Figura No. 43 Ecuación para el cálculo del límite de control inferior para el gráfico de datos individuales.	38
Figura No. 44 Gráfico de control de datos individuales.	39
Figura No. 45 Gráfico de control de rangos móviles.	39
Figura No. 46 Ecuación para el cálculo del límite de control superior para gráfico de rangos móviles.	39
Figura No. 47 Ecuación para el cálculo del límite de control central para gráfico de rangos móviles.	40

Figura No. 48 Ecuación para el cálculo del límite de control inferior para gráfico de rangos móviles.	40
Figura No. 49 Ecuación para el cálculo del rango móvil.	40
Figura No. 50 Ecuación de la media aritmética	40
Figura No. 51 Proceso general de realización del trabajo de graduación.	59
Figura No. 52 Proceso de determinación de cromo total en lámina galvanizada	60
Figura No. 53 Conversión de deposición de pasivante de ppm a g/m ²	61
Figura No. 54 Proceso de determinación de deposición de pasivante en lámina galvanizada	62
Figura No. 55 Cálculo de la capa de pasivante en lámina galvanizada.....	63
Figura No. 56 Proceso de ensayo de apilamiento húmedo	64
Figura No. 57 Proceso de ensayo de niebla salina	67
Figura No. 58 Fórmula para el tamaño de muestra de una población infinita.	71
Figura No. 59 Diagrama causa – efecto para el proceso de pasivación del acero galvanizado	76
Figura No. 60 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de apilamiento húmedo.....	81
Figura No. 61 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de apilamiento húmedo.....	81
Figura No. 62 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de apilamiento húmedo.....	82
Figura No. 63 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de apilamiento húmedo.	82
Figura No. 64 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de niebla salina.	85
Figura No. 65 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de niebla salina.	85
Figura No. 66 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de niebla salina.	86
Figura No. 67 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de niebla salina.....	86

Figura No. 68 Tiempo esperado de resistencia a la corrosión de cada concentración de ácido utilizado en función de la cantidad aplicada al producto final.....	87
Figura No. 69 Tabla de valores para la distribución normal	110
Figura No. 70 Media del pH de la solución pasivante aplicada	111
Figura No. 71 Rango del pH de la solución pasivante aplicada.....	111
Figura No. 72 Media de la concentración de la solución pasivante aplicada.....	112
Figura No. 73 Rango de la concentración de la solución pasivante.	112
Figura No. 74 Media de Cr^{+6}/Cr^{+3} presente en la solución pasivante aplicada.....	113
Figura No. 75 Rango de Cr^{+6}/Cr^{+3} presente en la solución pasivante aplicada.	113
Figura No. 76 Gráfica del costo aproximado esperado de cada ácido pasivante según la deposición utilizada.	135
Figura No. 77 Constantes para gráficos de control	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1 Comparación técnica de diferentes soluciones pasivantes.....	32
Tabla No. 2 Cristalería utilizada.....	53
Tabla No. 3 Equipos utilizados	54
Tabla No. 4 Reactivos utilizados	55
Tabla No. 5 Utensilios e instrumentos utilizados	56
Tabla No. 6 Experimentos, diseño experimental	69
Tabla No. 7 Variables respuesta	73
Tabla No. 8 Causas y evaluaciones del proceso de pasivación del acero galvanizado.	76
Tabla No. 9 Clave de identificación de las muestras de acero galvanizado analizadas, según la deposición de pasivante en el producto terminado.	78
Tabla No. 10 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de apilamiento húmedo.	79
Tabla No. 11 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de apilamiento húmedo.	79
Tabla No. 12 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de apilamiento húmedo.	80
Tabla No. 13 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de apilamiento húmedo.	80
Tabla No. 14 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de niebla salina.....	83
Tabla No. 15 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de niebla salina.....	83
Tabla No. 16 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de niebla salina.....	84
Tabla No. 17 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de niebla salina.....	84
Tabla No. 18 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante A en producto terminado.	114

Tabla No. 19 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante B en producto terminado.	114
Tabla No. 20 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante C en producto terminado.	115
Tabla No. 21 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante A.	116
Tabla No. 22 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante B.	118
Tabla No. 23 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante C.	120
Tabla No. 24 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado sin ácido pasivante.	123
Tabla No. 25 Condiciones de operación del ensayo de niebla salina.	123
Tabla No. 26 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante A.	124
Tabla No. 27 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante B.	125
Tabla No. 28 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante C.	125
Tabla No. 29 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado sin ácido pasivante.	126
Tabla No. 30 Datos calculados para la determinación de cromo y concentración del ácido pasivante aplicado.	127
Tabla No. 31 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante A en producto terminado.	128
Tabla No. 32 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante B en producto terminado.	128
Tabla No. 33 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante C en producto terminado.	129
Tabla No. 34 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante A.	130

Tabla No. 35 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante A.....	130
Tabla No. 36 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante B.....	131
Tabla No. 37 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante B.....	131
Tabla No. 38 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante C.	132
Tabla No. 39 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante C.	132
Tabla No. 40 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado sin ácido pasivante.	133
Tabla No. 41 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado sin ácido pasivante.	133
Tabla No. 42 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante A.	133
Tabla No. 43 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante B.	134
Tabla No. 44 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante C.	134
Tabla No. 45 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado sin ácido pasivante.	134
Tabla No. 46 Costos aproximados de cada solución pasivante.	135

1. INTRODUCCIÓN

El acero es un producto utilizado mundialmente en variedad de industrias como construcción, agricultura, automotriz, etc. La susceptibilidad de este material a ser oxidado por la presencia de oxígeno en el ambiente y en el agua crea la necesidad de recubrirlo con una barrera de protección. El metal más utilizado para este fin es el zinc. Sin embargo, el zinc es un elemento reactivo y tiende a corroerse en presencia de humedad.

La corrosión es un problema que afecta los metales, importante de considerar debido a que la mayoría de estructuras se encuentran fabricadas de ellos, principalmente de acero; y la magnitud de esto no solo puede verse reflejada en la degradación de los materiales sino también en el aumento de costos. Sin embargo la corrosión puede ser controlada. Los científicos estiman que entre un 25% y un 30% de los costos de la corrosión podrían evitarse si se emplean estrategias preventivas. El interés de los consumidores ha aumentado y se ha dirigido a obtener productos con métodos de protección que garanticen larga vida útil.

La mejor forma de retardar la oxidación del zinc es la aplicación de una capa de recubrimiento llamada pasivante. Esta fina capa es aplicada durante la producción y brinda protección extra al acero galvanizado. El tipo más utilizado de pasivante es un recubrimiento basado en una solución de ácido crómico. Sin embargo se han desarrollado varias alternativas, para garantizar larga vida útil y dar un valor estético agregado.

En el presente trabajo de graduación se da a conocer la evaluación de un proceso de pasivación de acero galvanizado, como parte de un proceso productivo a través de tres distintas concentraciones de ácido pasivante. El trabajo elaborado permitió analizar las etapas del proceso de pasivación con cromo, así como evaluar la efectividad de protección de tres concentraciones alternativas de pasivación, establecer la dependencia de la deposición de pasivante en la resistencia a la corrosión y aportar los conocimientos de la carrera de Ingeniería Química Industrial.

1.1. Lo escrito sobre el tema

1.1.1 Asrar, N.; MacKay, B.; Birketveit, O.; Stipanicev, M.; Jackson, J.; Jenkins, A.; Melot, D.; Scheie, J.; Vittonato, J. (2016) describen que la corrosión convalida la ley universal de la entropía, según la cual todo tiende a un estado de mayor caos y desorden. La corrosión ha causado grandes deterioros en las construcciones y degradación de materiales. En ciertos ambientes, los efectos no controlados de la corrosión pueden aparecer súbitamente y, si no se manejan adecuadamente, sus consecuencias pueden implicar un costo elevado.

En las distintas épocas, y a pesar de la falta de comprensión de los mecanismos fundamentales involucrados, los seres humanos procuraron controlar la corrosión. Los primeros métodos de control de la corrosión incluyeron la utilización de bitumen y pinturas a base de plomo, como es el caso de los romanos del siglo I. Alrededor del año 500 a.C., los fabricantes de espadas chinas utilizaban revestimientos de sulfuro de cobre para inhibir la corrosión de las espadas de bronce. Algunos siglos después, el recubrimiento de cobre utilizado en las embarcaciones británicas para reducir las incrustaciones biológicas (acumulación de depósitos de organismos tales como los balanos y las algas en las superficies subacuáticas) e incrementar la velocidad aceleró la corrosión de los clavos que mantenían unidas dichas embarcaciones.

El conocido Michael Faraday es uno de los colaboradores más importantes que ayudó a comprender la corrosión, cuando a comienzos de la década de 1800 estableció una relación cuantitativa entre la acción química de la corrosión y la corriente eléctrica.

La industria que destaca por su interés en la lucha contra la corrosión es la industria del petróleo y el gas. Empresas petroleras han identificado que la corrosión tiene un costo indirecto significativo asociado con problemas de salud, seguridad y medio ambiente.

1.1.2 Langill, T. (1999) define los beneficios de un tratamiento de pasivado con cromo dando a conocer que éstos se deben a la presencia de cromo hexavalente y cromo trivalente en la capa protectora y a la reacción química con el recubrimiento de zinc.

La principal razón del uso de pasivado con cromo es prevenir el apareamiento de manchas por almacenamiento húmedo en las primeras seis semanas después de la galvanización, tiempo en el que el acero galvanizado es más propenso a sufrir formación de óxido de zinc e hidróxido de zinc. La aplicación de una capa delgada de cromatos sobre el recubrimiento de zinc inhibe la formación de los óxidos de zinc.

Lagill expone que la capa protectora de cromatos aplicada sobre el galvanizado dura generalmente seis semanas antes de ser consumida. Posterior a este tiempo, el acero galvanizado queda expuesto naturalmente al ambiente.

Los tratamientos de pasivación con cromatos se utilizan en acero recubierto con zinc, y generalmente para controlar la reacción del zinc con el concreto. La reacción principal que previene el cromato es el desarrollo del hidrógeno el cual afecta la unión del zinc y el concreto.

1.1.3 Tomachuk, C.; Di Sali, R.; Elsner, C. (2010) manifiestan el éxito que han tenido los tratamientos de protección con cromo hexavalente durante muchos años. Sin embargo, se centran en el estudio de utilizar productos basados en Cr^{+3} .

La experimentación de tratamientos pasivantes a base de cromo trivalente utilizando distintos colores como distintivo de cada producto utilizado ha sido el punto de partida de numerosas investigaciones. Se han realizado pruebas con color azul, verde y amarillo cada uno con una formulación distinta.

De experimentos realizados con las alternativas de pasivantes, los autores concluyen que:

- A mayor uniformidad, menor es la velocidad de corrosión.
- Las técnicas electroquímicas son una buena forma de caracterizar la velocidad de corrosión con diferentes materiales.
- Los resultados obtenidos con los compuestos evaluados de cromo trivalente (con técnicas electroquímicas) son de gran interés, sin embargo para concluir si éstos pueden sustituir al cromo hexavalente con la misma efectividad se deben practicar otras pruebas.

1.1.4 Bishop, C. (2001) define los beneficios del cromo hexavalente como elemento pasivante y de protección al zinc ante la corrosión. El pasivado con cromo hexavalente se caracteriza por necesitar tecnología amigable, tiene un alto beneficio en relación al costo, puede operarse con facilidad en cantidades masivas y los requisitos de control y producción son fáciles de operar. Sin embargo debido a la característica de toxicidad del cromo⁺⁶ se han realizado búsquedas de una alternativa más amigable con el ambiente.

Existen varias propuestas de alternativas al tratamiento de pasivado con cromo hexavalente desde 1990, sin embargo se presta principal atención al cromo trivalente por poseer características similares al cromo hexavalente y no representar un peligro para la salud o el medio ambiente.

Los estudios realizados a la protección con cromo trivalente muestran que éste tiene algunas desventajas:

- El color que puede adquirir no llega a ser igual al que puede adquirir el cromo hexavalente.
- La resistencia a la corrosión es reducida.
- No presenta la capacidad de “auto curación” que presenta el recubrimiento con cromo IV, ya que ésta se debe exclusivamente a la presencia de iones Cr⁺⁶.

1.1.5 Grasso, L.; Segre, A.; Ienco, M.; Parodi, A.; Pinasco, M.; Engelini, E.; Rosalbino, F. (2006) exponen las consideraciones ambientales que se han tomado desde el 2002 acerca de la toxicidad de los compuestos de cromo hexavalente. Debido a que el tratamiento pasivante para recubrir el zinc contiene tanto cromo hexavalente como trivalente, presentes en la solución, el cromo trivalente ha sido objeto de amplios estudios para comprobar su capacidad protectora.

Tanto el tratamiento de pasivado con cromo hexavalente, como el trivalente han sido utilizados con acero galvanizado con zinc aproximadamente al 99%.

Las cantidades de cromo hexavalente utilizado en la capa pasivante es aproximadamente 6 - 10 mg/m², mientras que el proceso de pasivado con cromo

trivalente permite agregar 20 – 30 mg/m². Esta diferencia en la capa de cromo presente como inhibidora de la oxidación, es clave pues el recubrimiento con cromo trivalente presentó mejores resultados.

Se afirma que el recubrimiento con cromo trivalente es más resistente a la corrosión del zinc, si es aplicado en la cantidad mencionada.

1.2. Resumen crítico del marco teórico

1.2.1. Evaluación

La evaluación consiste en determinar si se han logrado los objetivos previamente establecidos. Este proceso se basa en un juicio de valor sobre la programación establecida, emitida al contrastar la información obtenida con dichos objetivos. (UCLM, 2017)

1.2.2. El acero

El acero es una aleación de hierro con determinada cantidad de carbono. Las cantidades de carbonos presentes en la aleación pueden variar entre 0.05% y 2% (Infoacero, 2000). El acero es uno de los materiales de fabricación y construcción más versátil, adaptable y ampliamente utilizado. El acero se caracteriza por poseer resistencia y a la vez presentar la posibilidad de ser moldeado; sus propiedades pueden ser manejadas de acuerdo a las necesidades específicas mediante tratamientos de calor, trabajo mecánico o aleaciones.

1.2.3. Metales

Los metales tienen conductividades eléctricas y térmicas superiores que los elementos no metálicos, lustre característico y la capacidad de deformarse bajo presión sin romperse. La tendencia de estos elementos hacia la formación de cationes por pérdida de electrones y la formación de óxidos básicos están entre las características químicas de los metales.

Los metales tienen energías de ionización y electronegatividades comparativamente bajas. Por consiguiente, los electrones externos de los átomos metálicos son fáciles de separar por no estar tan fuertemente unidos.

Propiedades físicas: las densidades de los metales muestran una amplia variación, aunque la mayoría de los metales tienen densidades relativamente altas en comparación con las densidades de los sólidos no metálicos.

Existe considerable variación entre los puntos de fusión y ebullición de los metales, pero, naturalmente, no se observan los bajos valores tópicos de los no metales

gaseosos. En general, la mayoría de los metales poseen puntos de fusión y de ebullición comparativamente altos.

La fuerza del enlace metálico está relacionada con el número de electrones deslocalizados por átomos utilizados en el enlace. La deformabilidad, el lustre, la conductividad térmica y eléctrica, son las propiedades más características del enlace metálico y del estado metálico. La alta conductividad eléctrica también es una característica importante de los metales.

El hierro es uno de los metales de transición, los cuales se caracterizan por tener altos puntos de fusión y ebullición, elevados calores de fusión y calores de vaporización. La mayoría son buenos conductores del calor y electricidad. La característica de las configuraciones electrónicas de los elementos de transición es el crecimiento gradual de los subniveles *d* del nivel contiguo al exterior. Presentan una amplia variación en propiedades químicas. (Mortimer, 1983)

1.2.4. Oxígeno

El oxígeno es el elemento más abundante. El oxígeno libre constituye cerca del 21% del volumen o 23.2% de la masa de la atmósfera. La mayoría de los minerales contienen oxígeno. La principal fuente comercial de oxígeno es la atmósfera. Del aire es una mezcla. La composición del aire varía con la altitud y, en menor extensión, con el sitio.

Las reacciones del oxígeno son más demoradas de lo que se pronosticaría partiendo del hecho de que el oxígeno es un elemento muy electronegativo. La razón de esta lentitud es que la energía de enlace del oxígeno es alta (494 kJ/mol); por consiguiente, las reacciones que requieren la ruptura del enlace oxígeno – oxígeno sólo ocurren a altas temperaturas. Muchas de estas reacciones son relativamente muy exotérmicas y producen suficiente calor para mantenerse ellas mismas después que se han iniciado por calentamiento externo. (Mortimer, 1983)

1.2.5. Oxidación

La oxidación es el estado de los átomos en donde carecen de electrones y se producen cuando interactúan dos o más sustancias. El átomo de metal pasa de un estado neutral a una carga positiva de iones cuando entra en contacto con el oxígeno, produciendo el óxido. El oxígeno presente en el aire es un agente oxidante, es por eso que los metales que se encuentran al aire libre se oxidan fácilmente.

La oxidación tiene lugar por medio de una reacción química en donde un metal o un no metal ceden electrones, y por tanto aumenta su estado de oxidación. La reacción química opuesta a la oxidación se conoce como reducción, es decir cuando una especie química acepta electrones. Estas dos reacciones siempre se dan juntas cuando una sustancia se oxida.

El nombre “oxidación” proviene de que en la mayoría de estas reacciones, la transferencia de electrones se da mediante la adquisición de átomos de oxígeno (cesión de electrones) o viceversa. (Nervion, 2017)

El proceso de oxidación depende de la cantidad de oxígeno que está presente en el aire y la naturaleza del material que toca.

- Oxidación lenta: es la que ocurre casi siempre en los metales a causa del agua o aire, causando su corrosión y pérdida de brillo y otras propiedades características de los metales, desprendiendo cantidades de calor inapreciables; al fundir un metal se acelera la oxidación, pero el calor proviene principalmente de la fuente que derritió el metal y no del proceso químico. (Nervion, 2017)
- Oxidación rápida: es la que ocurre durante lo que se conoce la combustión, desprendiendo cantidades apreciables de calor, en forma de fuego, y ocurre principalmente en sustancias que contienen carbono e hidrógeno (hidrocarburos). (Nervion, 2017)

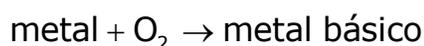
Cuando el oxígeno se combina con un metal, puede formar óxidos básicos o peróxidos, estos óxidos se caracterizan por ser de tipo básicos. Si se combina el

oxígeno con un no metal forma óxidos ácidos también llamados anhídridos y caracterizados por ser de tipo ácido (actúan como ácidos).

En el caso del hierro, se combina para formar óxidos básicos.

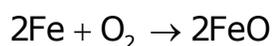
- Óxidos básicos: la reacción de experimenta el hierro con oxígeno corresponde a la formación de óxidos básicos debido a la naturaleza del hierro; metal.

Figura No. 1 Reacción de formación de óxidos básicos



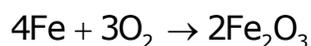
El hierro tiene dos estados de valencia, por lo que es posible formar dos tipos de óxido.

Figura No. 2 Reacción de oxidación de hierro (II)



Cuando el hierro con estado de valencia 2, reacciona con el oxígeno, se forma el compuesto llamado óxido ferroso (sistema antiguo), monóxido de hierro (sistema por atomicidad) u óxido de hierro (II) (sistema stock).

Figura No. 3 Reacción de oxidación de hierro (III)



Cuando el hierro con estado de valencia 3, reacciona con el oxígeno, se forma el compuesto llamado óxido férrico (sistema antiguo), trióxido de hierro (sistema por atomicidad) u óxido de hierro (III) (sistema stock).

Para metales que tienen más de un electrón de valencia, el óxido producido generalmente depende de la cantidad de oxígeno, la cantidad del metal y las condiciones de las reacciones.

- Reacciones Redox: la reacción en la que una sustancia gana átomos de oxígeno es la oxidación, y la reacción en la que una sustancia pierde átomos de oxígeno es la reducción. Una oxidación y una reducción deben tener lugar

simultáneamente siempre y cuando esto sucede se dice que tiene lugar una reacción de oxidación – reducción o reacción redox.

Durante las reacciones redox ocurren cambios en el estado de oxidación de los elementos participantes. En el proceso de oxidación el estado de oxidación de algún elemento aumenta al perder electrones, y en un proceso de reducción el estado de oxidación de algún elemento disminuye al ganar electrones. Aunque los cambios en el estado de oxidación implican a los elementos, la oxidación o reducción afecta a toda la molécula en la que se encuentra ese elemento. (Petrucci, 2011)

- Agentes oxidantes y reductores: en una reacción redox se llama agente oxidante u oxidante a la sustancia que hace posible que otra sustancia se oxide. Al hacerlo, el agente oxidante a su vez se reduce. Análogamente, se llama agente reductor o reductor a la sustancia que hace posible que otra sustancia se reduzca. A su vez el agente reductor se oxida en la reacción.

Un agente oxidante (oxidante):

- Produce la oxidación de otras sustancias.
- Contiene un elemento cuyo estado de oxidación disminuye en la reacción redox.
- Gana electrones.
- Se reduce.

Un agente reductor (reductor):

- Produce la reducción de otras sustancias.
- Contiene un elemento cuyo estado de oxidación aumenta en la reacción redox.
- Pierde electrones.
- Se oxida. (Petrucci, 2011)

1.2.6. Galvanización

La galvanización es un proceso por el que se aplica un recubrimiento de zinc sobre las piezas de acero o fundición mediante inmersión de las mismas en un baño de zinc fundido. El mejor método para este proceso es la inmersión continua en caliente.

1.2.7. Protección de barrera con zinc

El mecanismo principal por el que los revestimientos galvanizados protegen al acero involucra la formación de una barrera impermeable que no permite que la humedad tenga contacto con el acero ya que sin humedad (electrolito) no hay corrosión. La naturaleza del proceso de galvanización asegura que el revestimiento metálico de zinc tenga una excelente adhesión y resistencia a la abrasión y a la corrosión. Los revestimientos galvanizados no se degradan (agrietan, ampollan, pelan) como sucede con otros revestimientos de barrera, como la pintura. Sin embargo, el zinc es un material reactivo que se irá corroyendo y erosionando lentamente. Por esta razón, la protección que ofrece un revestimiento galvanizado es proporcional a su espesor y a la velocidad de corrosión. Es por lo tanto importante entender el mecanismo de corrosión del zinc y qué factores afectan la velocidad. (ASTM, 2006)

El acero galvanizado recién expuesto reacciona con la atmósfera circundante y forma una serie de productos de corrosión del zinc. En presencia de aire, el zinc que apenas se ha expuesto se combina con el oxígeno y forma una capa muy delgada de óxido de zinc. Si hay humedad, el zinc reacciona con el agua lo que ocasiona que se forme hidróxido de zinc. El producto final de la corrosión es el carbonato de zinc, que se forma cuando el hidróxido de zinc reacciona con el dióxido de carbono del aire. El carbonato de zinc forma una capa delgada, tenaz y estable (insoluble en agua) que protege al zinc subyacente y es la principal razón por lo que éste tiene una baja velocidad de corrosión en la mayoría de las condiciones ambientales. (ASTM, 2006)

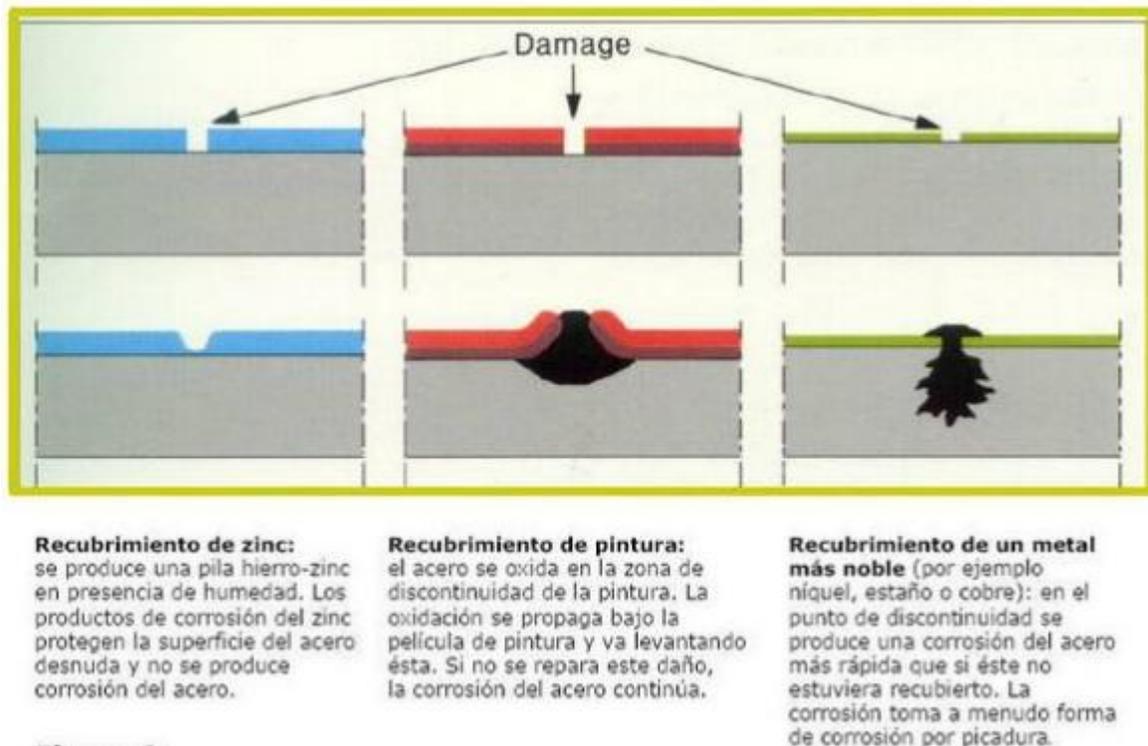
1.2.8. Protección catódica con zinc

El proceso electroquímico (corrosión) capaz de destruir una estructura metálica ocurre por la acción de numerosas celdas galvánicas que se forman en su superficie. Este proceso se detiene cuando se hace fluir la corriente en sentido contrario a través

de un ánodo de sacrificio, teniendo en cuenta que la corrosión es sólo factible en las zonas anódicas.

La protección por ánodos de sacrificio consiste en colocar un metal activo en contacto con el metal que se quiere proteger. De esta forma el metal sacrificado se convierte en ánodo, sufriendo corrosión, mientras la estructura metálica queda protegida al convertirse en cátodo. (Construmática, 2017)

Figura No. 4 Esquema de distintos recubrimientos aplicados sobre el acero.



Fuente: Construmática (2017)

En la Figura No. 4, se establece una comparación del recubrimiento con zinc, pintura y otros metales. El mecanismo de protección que ofrece el zinc proviene de la capacidad que tiene para proteger al acero galvánicamente. Cuando el acero de base queda expuesto, como sucede cuando hay un borde cortado o un rayón, el acero queda catódicamente protegido por la corrosión de sacrificio que tenga un revestimiento con zinc. Esto sucede porque el zinc es más electronegativo (más reactivo) que el acero, en la serie galvánica.

- Serie galvánica: la serie galvánica es el ordenamiento del comportamiento de varios metales. Es de gran utilidad ya que permite tener una idea sobre el comportamiento que presentarán los metales frente a la corrosión de una estructura que comprenda dos o varios metales incluidos en la serie.

Figura No. 5 Serie galvánica

	Electronegativo	Magnesio
		Zinc
		Aluminio
		Cadmio
		Hierro o Acero
		Aceros Inoxidables (activos)
		Plomo
		Estaño
		Cobre
	Electropositivo	Oro

Fuente: American Society of Testing and Materials [ASTM] International (2006).

El alcance de la eficacia de la protección galvánica que proporcionan los revestimientos con base de zinc depende principalmente del medio ambiente. Las áreas relativamente grandes de acero expuestas, cuando están completa y continuamente mojadas, especialmente con un electrolito fuerte, como por ejemplo el agua de mar, estarán protegidas mientras quede alguna cantidad de zinc. En el aire, en donde el electrolito está presente solamente en forma superficial o discontinua (como es el caso de las gotas de rocío o lluvia), las áreas de acero sin revestimiento que están protegidas son más pequeñas. El “poder cubridor” nominal de un revestimiento de zinc puro es de cerca de 0.125 pulgadas (3.2 mm), aunque éste puede variar significativamente dependiendo

del tipo de atmósfera que se tenga y de la cantidad de zinc que haya en el revestimiento. (ASTM, 2006)

En los revestimientos con base de zinc, la velocidad de consumo es considerablemente más baja que la del acero. Por ello, un revestimiento delgado de zinc puede proteger al acero durante largo tiempo.

1.2.9. Óxido blanco

Las manchas de color blanco que se observan en el material galvanizado suelen producirse durante su almacenamiento. Los óxidos que se producen son típicamente de color blanco, es por eso que recibe ese nombre, sin embargo pueden existir de color gris o negro.

Este tipo de óxido se origina generalmente cuando las planchas de acero galvanizado están en contacto próximo, ya sea en un rollo o en piezas apiladas, y se humedecen. El material puede humedecerse por mojadura o por condensación de la humedad atrapada.

La mancha de oxidación por almacenamiento es un depósito polvoso blanco o gris que puede desarrollarse en piezas recién galvanizadas. El zinc, como todos los metales, comienza a cambiar cuando se lo expone a la atmósfera. A medida que la superficie de zinc fresca interactúa con los ciclos de humectación y secado del ambiente, se forma en la superficie una capa protectora de productos de la corrosión del zinc, conocida colectivamente como pátina de zinc. (American Galvanizers Association, 2017)

Una vez que el revestimiento galvanizado de zinc está expuesto al aire de libre fluidez, se forma en la superficie una capa delgada de óxidos de zinc que comienza el proceso de erosión natural. Luego, cuando la pieza entra en contacto con la humedad (lluvia, rocío, humedecimiento), las partículas de óxidos de zinc capturan el agua para formar hidróxido de zinc poroso y gelatinoso. Mientras la superficie de hidróxido de zinc y óxido de zinc interactúa con el dióxido de carbono en la atmósfera, se forma una capa delgada, compacta y altamente adherente mayormente de carbonado de zinc. (American Galvanizers Association, 2017)

Figura No. 6 Reacción de formación de óxido de zinc.

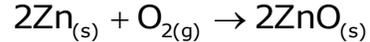
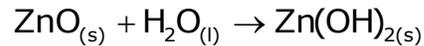


Figura No. 7 Reacción de formación de hidróxido de zinc.



La tasa de la formación de pátina varía según las condiciones ambientales, pero por lo general lleva de 6 a 12 meses para que se desarrolle enteramente. La pátina desarrollada por completo es una película pasiva, estable e insoluble en agua sobre la superficie de zinc que no se lava con la lluvia o la nieve. A medida que la pátina de zinc se forma, el aspecto del revestimiento galvanizado se tornará gris mate, y la película protectora de la pátina ralentizará la tasa de corrosión a cerca de 1/30 de la tasa del acero en el mismo entorno. (American Galvanizers Association, 2017)

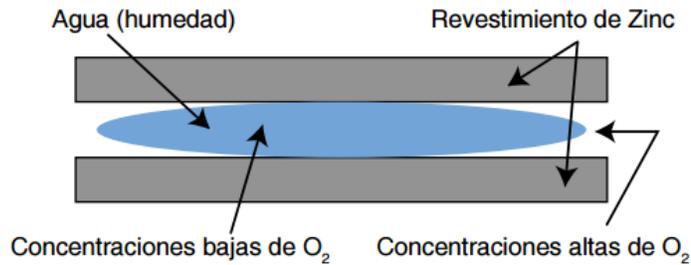
La formación de la pátina de zinc es crítica para la resistencia duradera a la corrosión del acero galvanizado en caliente en exposiciones atmosféricas. Como la pátina depende de los ciclos de humectación y secado en el ambiente, los resultados de pruebas de corrosión aceleradas de spray de sal, u otras pruebas con exposición constante a la humedad, no son precisas para predecir la vida útil de los revestimientos galvanizados en el mundo real. (American Galvanizers Association, 2017)

- Formación de la mancha de oxidación por almacenamiento: cuando a los artículos recién galvanizados se los priva de un flujo de aire adecuado, puede quedar atrapada humedad en la superficie del revestimiento y alterar la formación natural de la pátina de zinc. La humedad atrapada representa un conjunto diferente de condiciones que crean una reacción que producirá, con rapidez, un producto blanco polvoso de la corrosión del zinc en la superficie (reacción No. 7).

Cuando una gota de agua queda aplanada entre dos superficies, la superficie de zinc cerca del medio de la gota recibe una cantidad distinta de oxígeno en relación con la superficie de zinc en el borde de la gota. La exposición variada provoca una diferencia en el potencial electrolítico del zinc. El área central

puede volverse anódica y el área del borde, catódica, lo que genera una posible celda de corrosión. (American Galvanizers Association, 2017).

Figura No. 8 Diagrama de humedad atrapada entre superficies revestidas con zinc.



Fuente: American Galvanizers Association, 2015.

Figura No. 9 Reacción catódica de formación de óxido por almacenamiento.

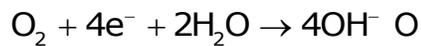
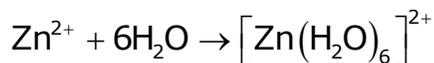


Figura No. 10 Reacción anódica de formación de óxido por almacenamiento.



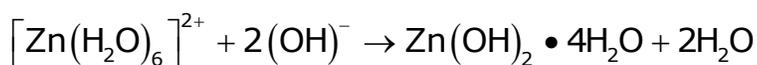
A continuación, los iones de zinc se hidratan:

Figura No. 11 Reacción de hidratación de los iones de zinc.



Los iones de zinc hidratados reaccionan con los iones hidroxilo del agua, precipitando como producto primario de corrosión en estado amorfo, formando una capa blanca, insoluble y protectora de hidróxido de zinc sobre el galvanizado:

Figura No. 12 Reacción de formación de hidróxido de zinc por almacenamiento.



Si esta celda de corrosión de forma, el área anódica comienza a corroerse, mientras que la catódica queda intacta. Se forman en la superficie productos de corrosión similares al hidróxido de zinc soluble de la pátina de zinc. Como el hidróxido de zinc queda bastante estable bajo estas condiciones, los iones de zinc aun dejan que el revestimiento se una al agua, lo que crea una sustancia polvosa blanca visible y espesa. Siempre y cuando el área esté limitada de oxígeno, también se limita el flujo de dióxido de carbono, lo que dificulta la conversión a carbonato de zinc. (American Galvanizers Association, 2017)

El grado de consumo del revestimiento de zinc por la mancha de oxidación por almacenamiento obedece a la duración de la exposición a la humedad atrapada sin aire de libre fluidez. Si la humedad atrapada contiene cloruros (de agua salda, compuestos de azufre, residuos de flujos), el ataque se acelerará porque estos contaminantes aumentarán la conductividad eléctrica del agua, lo que incrementa el ataque al metal de zinc del revestimiento galvanizado. Durante el transporte, la humedad rica en cloruros de sales de carretera puede quedar atrapada en el acero, incluso bajo una lona, y causar mancha de oxidación por almacenamiento. Incluso el agua sola puede causar la formación de mancha de oxidación por almacenamiento en un período de tiempo relativamente corto. La exposición a lluvias torrenciales, rocío o condiciones de humedad muy alta, después de que se forma el galvanizado, pueden iniciar el desarrollo de óxidos de zinc e hidróxidos de zinc. Los productos de corrosión por mancha de oxidación por almacenamiento son voluminosos (de tres a cinco veces más que el metal de zinc), por lo que cualquier ataque parece ser más grave de lo que realmente es. La mancha de oxidación por almacenamiento es muy antiestética, pero por lo general provoca una pérdida de metal de zinc muy pequeña, por eso, no tendrá un efecto importante en la vida útil del revestimiento. (American Galvanizers Association, 2017)

1.2.10. Corrosión

La corrosión es un proceso electroquímico que en el caso del acero, oxida al hierro que hay en el acero y causa que éste se vuelva más delgado con el tiempo. La oxidación, o formación de herrumbre, ocurre como resultado de la reacción química que hay entre el acero y el oxígeno. El oxígeno está presente siempre en el aire o puede estar disuelto en la humedad que existe en la superficie del acero. Durante el proceso de formación de herrumbre, el acero se consume verdaderamente durante la reacción de corrosión, ya que el hierro se convierte en productos de corrosión, es decir, simplemente regresa a su forma original y de más baja energía de óxido de hierro. (ASTM, 2006).

En el caso de la mayoría de los productos de acero bajo en carbono, el óxido de hierro (herrumbre) que se produce en la superficie no protege porque no forma una película continua y adherente. En lugar de ello, forma escamas, dejando hierro fresco expuesto a la atmósfera lo que a su vez ocasiona que haya más corrosión. Esta característica del acero es sumamente indeseable tanto desde un punto de vista estético como desde el aspecto de su vida útil. En un momento dado, con frecuencia más pronto de lo deseado, el acero se corroe lo suficiente como para que su vida útil se vea afectada, es decir, pierde resistencia estructural, se perfora o le entra agua, etc. (ASTM, 2006).

La reacción que se produce en el fenómeno de la corrosión depende de la naturaleza química del entorno y de la concentración efectiva de las especies reactivas. El efecto de la corrosión es una alteración de las propiedades de los materiales afectados, que puede venir acompañada de una pérdida de material. (Alcaraz, 2004)

En los materiales metálicos el proceso de corrosión es normalmente electroquímico, es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra. (Alcaraz, 2004)

La energía necesaria para arrancar un electrón de un metal varía mucho en los diferentes casos. Si dos metales se ponen en contacto, uno de ellos tenderá a aceptar electrones del otro hasta que la diferencia de potencial establecida por la transferencia sea suficiente para oponerse a un nuevo paso de electrones a través

de la superficie de contacto. Con el electrolito del medio, se produce una reacción de reducción en el ánodo y una reacción de oxidación en el cátodo.

- Corrosión directa o atmosférica: resulta de la combinación de los átomos metálicos con los de la sustancia agresiva. En el caso del hierro puede deberse a la acción del oxígeno o del azufre

Figura No. 13 Reacción de oxidación del hierro causada por la acción del oxígeno atmosférico.

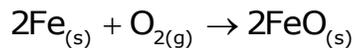
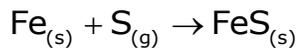
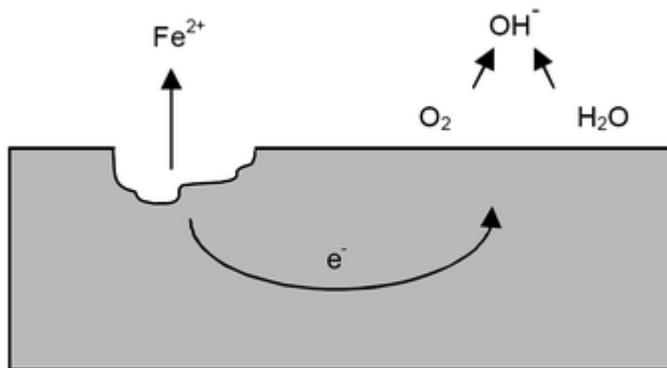


Figura No. 14 Reacción de oxidación del hierro causada por la acción del azufre.



Los factores que influyen en la corrosión atmosférica son la temperatura, la presencia de contaminantes ambientales y la humedad.

Figura No. 15 Diagrama de corrosión directa o atmosférica.



Fuente: E-ducativa (2016)

Respecto a la intensidad con que se manifiestan los fenómenos de corrosión podemos definir tres tipos de ambientes atmosféricos:

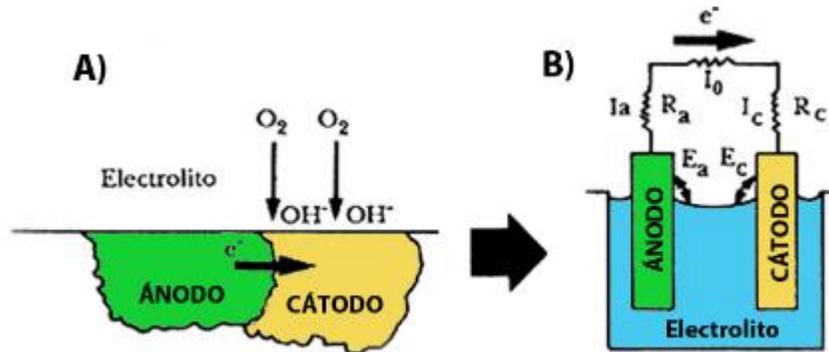
- Industriales: gran cantidad de partículas en suspensión aérea, principalmente compuestos sulfurosos, nitrosos y otros agentes ácidos.

- Marinos: la salinidad del agua del mar se debe a la presencia de clorhidro, un ión particularmente agresivo que favorece la corrosión de los sistemas metálicos.
- Rurales: al existir bajos niveles de partículas ácidas y otros compuestos agresivos en este tipo de ambientes, se produce un menor efecto de corrosión atmosférica. (E-ducativa, 2016)
- Corrosión electroquímica o galvánica: este tipo de reacción es un caso particular de unos sistemas químicos conocidos como “pila galvánica”. Estos sistemas están formados por una zona anódica (la que se va a corroer) y una zona catódica (la que se va a reducir).

Ambos sistemas están en contacto eléctrico a través de un medio que permite la transmisión de los electrones, al que llamaremos electrolito. El electrolito, salvo casos en los que está sumergido o enterrado el metal, es el agua condensada de la atmósfera. Para ello es necesario que la humedad relativa sea superior al 70%.

Al establecer el contacto eléctrico entre ambos sistemas se observa que el metal más electronegativo actúa como ánodo, oxidándose. Por su parte el menos electronegativo se reduce. Aparece un flujo de electrones, conocido como corriente eléctrica, desde el ánodo hacia el cátodo. La capacidad de cada metal para oxidarse sigue la secuencia de la “serie galvánica”; mientras más alta sea la electronegatividad del metal, se oxida con mayor dificultad. Los metales menos electronegativos actúan como cátodos y los más electronegativos como ánodos, corroyéndose. (E-ducativa, 2016)

Figura No. 16 Diagrama de corrosión electroquímica o galvánica.



*(A) Micropila (B) Esquema eléctrico.

Fuente: E-ducativa (2016)

1.2.11. Procesos corrosivos

Es posible que se produzcan dos procesos básicos de ataques corrosivos dependiendo el medio en el que se producen:

- Corrosión seca: tiene lugar cuando el material se encuentra sometido a la acción de gases, principalmente a temperaturas elevadas, por lo que no se tiene un electrolito condensado. En primera instancia, la capa externa del material se recubre del producto de la oxidación, por lo que el proceso de corrosión tiene lugar por difusión, lo que hace que sea difícil y lento. Los óxidos que se forman son de carácter iónico (cationes metálicos y aniones de óxido distribuidos).
- Corrosión húmeda: tiene lugar cuando el material se encuentra en medios acuosos. Se produce normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada.

1.2.12. Velocidad de corrosión

La resistencia a la corrosión de un determinado metal o aleación ha sido por varios años el punto de estudio. Las pruebas y ensayos de laboratorio permiten definir las condiciones más semejantes al ambiente real y de esta forma estudiar el comportamiento del metal.

Para estudiar la velocidad de corrosión el método más utilizado es el de medida de la pérdida de peso. Esto consiste en cuantificar el peso perdido de un metal al estar expuesto a un medio corrosivo.

Las unidades utilizadas para expresar la pérdida de peso del metal en el medio expuesto son miligramos decímetro cuadrado día (mdd), milímetros por año (mm/año), pulgadas por año o milipulgadas por año. Esta medición puede ser utilizada como parámetro de evaluación para varios materiales que han sido expuestos al mismo medio corrosivo. Un valor menor en la pérdida de peso del material indica una mayor resistencia a la corrosión.

- Factores que modifican la velocidad de corrosión: la velocidad de corrosión depende de diversos factores. Entre ellos:
 - Disponibilidad de oxígeno: es indispensable para mantener el proceso de corrosión. Generalmente se piensa que el acceso de oxígeno es el factor determinante de la velocidad de corrosión, sin embargo, varios experimentos han mostrado que la velocidad de corrosión es máxima cuando los poros tienen suficiente agua sin llegar a saturarse. En estas condiciones, la difusión del oxígeno desde el exterior está más impedida.
 - Humedad sobre la superficie metálica: el electrolito es la capa de humedad sobre el metal, y la corrosión dependerá del tiempo que ésta haya permanecido sobre la superficie metálica. Proporciona los iones OH^- con los que se formarán productos de corrosión, sin embargo es insuficiente por si sola para provocar corrosión.
 - Humedad relativa del aire: el acero no se corroe en ambientes con humedades relativas menores a 70%. La humedad crítica está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido contaminante presente, como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 y el 70% en el acero, cobre, níquel y zinc.

- Los contaminantes gaseosos y sólidos aumentan el efecto corrosivo de los factores meteorológicos. El cloruro de sodio (NaCl) y el dióxido de azufre (SO₂) son los principales contaminantes corrosivos en la atmósfera.
- Partículas de polvos en suspensión en la atmósfera: en conjunto con la humedad, forman celdas de corrosión por aireación diferencial en la superficie. A través de la absorción de SO₂ también pueden acelerar la corrosión en la zona de contacto con el metal.
- Exposición a agua de lluvia: el agua de lluvia puede lixiviar inhibidores solubles de revestimientos protectores, así como productos de corrosión con características similares.
- Vapores de ácidos orgánicos: éstos resultan muy agresivos en atmósferas húmedas, aún en concentraciones de 0.1 partes por millón (ppm). (ILCE, 2017)

1.2.13. Formas de corrosión

- Corrosión generalizada o uniforme (más frecuente, fácil de determinar por la pérdida de peso): es la corrosión que se produce con el adelgazamiento uniforme producto de la pérdida regular del metal superficial.
- Corrosión localizada (pérdida mínima de peso, puede alterar drásticamente sus propiedades mecánicas): es la corrosión en donde la pérdida de metal ocurre en áreas discretas o localizadas.
- Corrosión fisurante: es la que se produce en pequeñas cavidades o huecos formados por el contacto entre una pieza de metal igual o diferente a la primera, o más comúnmente con un elemento no metálico.
- Corrosión por picadura o “pitting”: es altamente localizada, se produce en zonas de baja corrosión generalizada donde la reacción anódica produce unas pequeñas picaduras en el cuerpo. Puede observarse generalmente en superficies con poca o casi nula corrosión generalizada. Ocurre como un

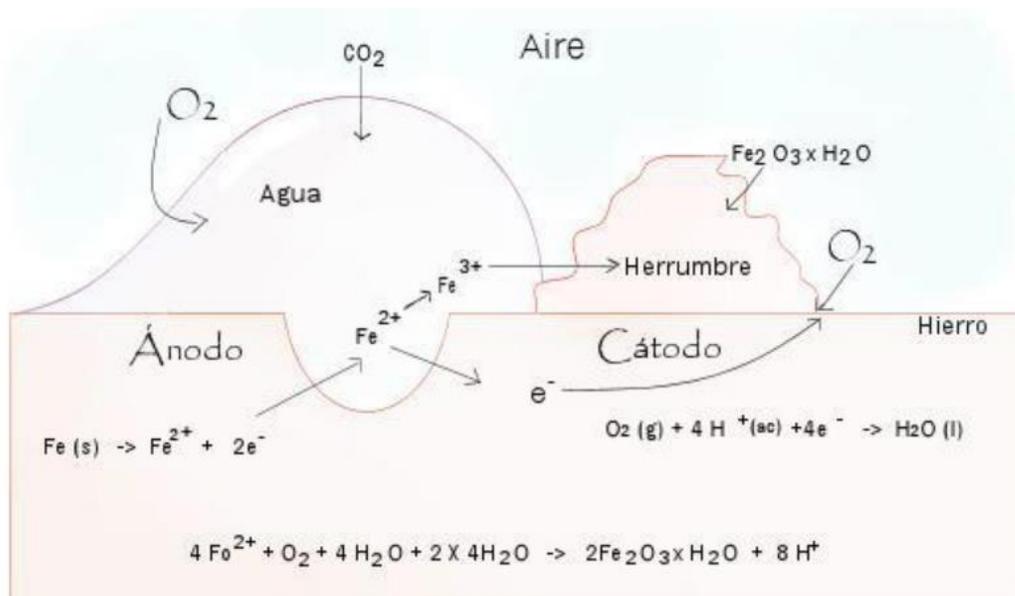
proceso de disolución anódica local donde la pérdida de metal es acelerada por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo mucho mayor.

(Textos Científicos, 2005)

1.2.14. Proceso de formación de la corrosión

La corrosión de los metales, y en particular el hierro, es un proceso electroquímico debido a que sobre la pieza del metal que se corroe existen zonas anódicas y catódicas, en el cual el hierro se oxida con el oxígeno del aire en presencia de humedad, para dar un producto que carece de las propiedades estructurales del hierro metálico, como lo es el óxido de hierro (III) hidratado ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$) de color café rojizo al que se le llama “herrumbre”.

Figura No. 17 Diagrama de proceso de corrosión.

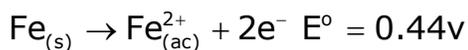


Fuente: Broseta (2017)

El proceso de corrosión se desarrolla fundamentalmente en dos etapas:

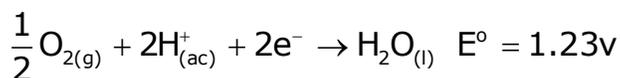
1. Pila galvánica: la primera etapa puede ser interpretada como una pila galvánica, en la que una zona de la superficie del hierro funciona como ánodo y tiene lugar la oxidación del hierro metálico o ión hierro (II).

Figura No. 18 Reacción de oxidación del hierro metálico.



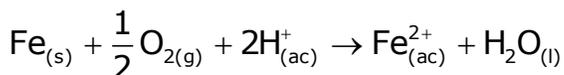
En otra región contigua a la superficie del metal que funciona como cátodo, tiene lugar la reducción del oxígeno atmosférico a agua.

Figura No. 19 Reacción de reducción del oxígeno atmosférico a agua.



De esta forma, con la oxidación y reducción, se lleva a cabo la reacción global:

Figura No. 20 Reacción global de oxidación – reducción de hierro y oxígeno.



El potencial de esta pila se obtiene de los potenciales de la oxidación y reducción.

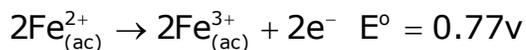
Figura No. 21 Potencial de la oxidación – reducción de hierro y oxígeno.

$$E^{\circ} = E^{\circ}_{\text{cátodo}} - E^{\circ}_{\text{ánodo}} = 1.23 - (-0.44) = 1.67\text{v}$$

La reacción global ocurre en medio ácido, donde los protones requeridos, son aportados por cualquier ácido como el CO₂ atmosférico disuelto en agua. Asimismo la reacción global es espontánea.

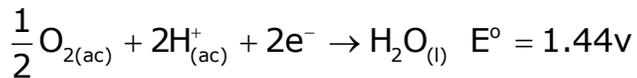
2. Formación de la herrumbre: en la segunda etapa se da la formación de la herrumbre, donde el ión hierro (II) sale de la superficie del metal y migra a la gota de agua, donde se oxida a ión hierro (III):

Figura No. 22 Reacción de oxidación del ión hierro (II)



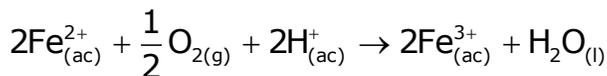
Simultáneamente el oxígeno disuelto en el agua se reduce:

Figura No. 23 Reacción de reducción del oxígeno disuelto en agua.



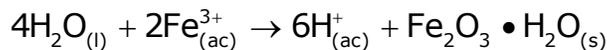
La reacción global producida en la segunda etapa es:

Figura No. 24 Reacción global de oxidación – reducción del ión hierro (II) y oxígeno.



El potencial de la reacción global es alto y positivo, por lo que el proceso es espontáneo. Los iones Fe^{3+} precipitan como óxido de hierro (III) hidratado como consecuencia de la desprotonación de las moléculas de agua:

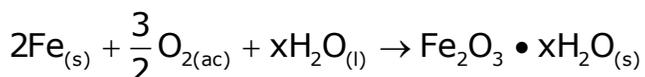
Figura No. 25 Reacción de desprotonación de las moléculas de agua.



Esta reacción reestablece los protones necesarios para que la reacción global de la primera etapa vuelva a ocurrir.

El proceso global de corrosión del hierro se resume en la siguiente reacción.

Figura No. 26 Reacción global de corrosión de hierro.



La corrosión del hierro también puede llevarse a cabo en un medio neutro o débilmente básico. Para este proceso se llevan a cabo dos etapas:

1. Reducción del oxígeno: en la primera etapa el oxígeno del aire se reduce a ión hidróxido, donde los electrones son suministrados por la oxidación del hierro metálico.

Figura No. 27 Reacción de reducción de oxígeno en medio básico o neutro.

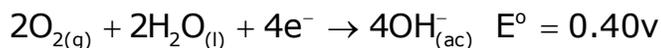
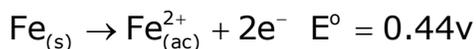
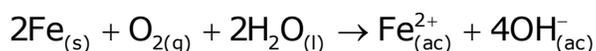


Figura No. 28 Reacción de oxidación de hierro en medio básico o neutro.



La reacción global del proceso tiene un potencial de 0.84v positivo, menor que en medio ácido. Esta reacción puede ocurrir de forma espontánea.

Figura No. 29 Reacción global oxidación – reducción de la reducción de oxígeno y oxidación de hierro.



2. Formación de la herrumbre: en la segunda etapa se forma el hidróxido de hierro (II), el cual se oxida a hidróxido de hierro (III) y este se convierte en óxido de hierro (III) llamada herrumbre.

Figura No. 30 Reacción formación de hidróxido de hierro (II) en medio básico o neutro.

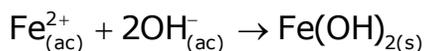


Figura No. 31 Reacción de oxidación del hidróxido de hierro (II) en medio básico o neutro.

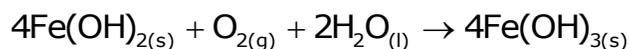
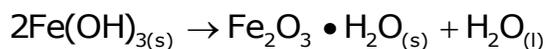


Figura No. 32 Reacción de formación de óxido de hierro (III) en medio básico o neutro.



(Broseta, 2017)

1.2.15. Pasivación

Pasividad es la propiedad que presenten determinados metales y aleaciones de permanecer prácticamente inertes en determinados medios. Su función principal es proteger al metal de la corrosión, debido a que el metal de recubrimiento se comporta como metal activo y se disuelve a altas velocidades ante la presencia de corrosión. (UTN, 2017)

La resistencia de los aceros pasivados ante el ataque de los agentes corrosivos está relacionada con la pasividad de las superficies. Con la aplicación de una capa pasivante se obtiene una capa protectora superficial delgada, de espesor monomolecular. Ésta película se forma por la saturación de las valencias libres de los átomos de la capa superficial por el oxígeno de un intercambio de electrones entre los átomos de hierro y cromo. En otras palabras, se forma una débil capa de óxido de cromo.

La formación de la capa pasiva necesita de:

- Cromo
- Oxígeno

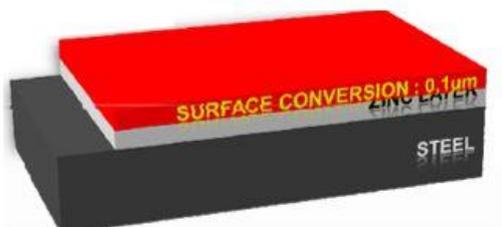
La estabilidad de la capa pasiva es un factor determinante para la resistencia a la corrosión de los aceros pasivados. El aumento del contenido cromo mejora y refuerza su estabilidad. (American Galvanizers Association, 2017)

Es importante tomar en cuenta que la capa pasiva puede destruirse con:

- Ácidos fuertes
- Medios reductores
- Halogenuros

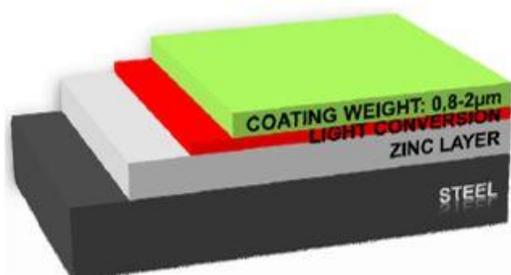
Según la literatura, una pieza sin pasivar tendrá un rendimiento inferior a 30 – 60% comparada con otra pieza pasivada al ser sometidas al ensayo de niebla salina. (IMINOX, 2017)

Figura No. 33 Esquema de la protección del acero galvanizado formada por ácido pasivante y solvente sin color.



Fuente: ProCoat (2012)

Figura No. 34 Esquema de la protección del acero galvanizado formada por ácido pasivante y solvente con color.



Fuente: ProCoat (2012)

- Pasivación de los metales: un metal activo en la serie electroquímica se considera pasivo cuando su comportamiento electroquímico llega a ser el de un metal apreciablemente menos activo o más noble. La pasividad de un metal se refiere a su pérdida de reactividad química en presencia de unas condiciones ambientales particulares.

Los electrolitos pasivadores son por lo general agentes oxidantes inorgánicos; los que son capaces de crear capas de óxidos absorbidas por la superficie e impermeables al posterior ataque corrosivo. (UPV, 2017)

- Pasivación crómica: La pasivación se logra cromando la superficie galvanizada de acero. La alta resistencia a la corrosión de la capa pasivante se debe a la presencia de iones Cr^{+6} y Cr^{+3} .

La formación de la capa pasivante se da cuando se lleva a cabo la reacción entre el cromo con el metal presente en la superficie (zinc en el caso del galvanizado) en presencia de otros componentes que funcionan como activadores, en un medio ácido. El cromo hexavalente es parcialmente reducido a cromo trivalente durante la reacción, a un pH ácido forma un complejo e hidróxidos de cromo y zinc. (American Society of Testing Materials, 2017)

Figura No. 35 Reacción de reducción de cromo hexavalente a cromo trivalente.

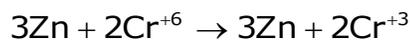


Figura No. 36 Reacción de disolución de zinc en ácido.

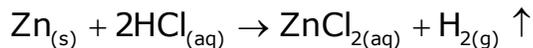


Figura No. 37 Reacción redox de cromo en medio ácido.

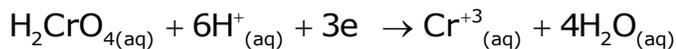
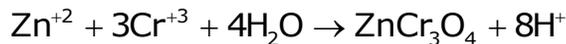


Figura No. 38 Reacción de formación de la capa de óxido de cromo y zinc.



Al consumirse el ácido, cambia la capacidad reactiva del cromo y precipita como óxido de cromo (básico). El óxido de cromo se adhiere a la capa de acero galvanizado y al estar totalmente cubierta detiene la reacción por el aumento del pH. Con la capa protectora formada se seca el material para dar el sellado necesario. (AUJOR, 2017)

- Recubrimientos con solventes orgánicos: los recubrimientos orgánicos como las pinturas, han sido utilizados para retrasar los procesos de corrosión en los metales. Estas soluciones aplicadas sobre el acero galvanizado forman una barrera aislante entre el sustrato y el medio que lo rodea, retardando el deterioro ocasionado por lo atmósfera. Los recubrimientos orgánicos ejercen diferentes tipos de protección sobre los sustratos metálicos:

- Efecto barrera: la capa aplicada posee un carácter aislante, impidiendo la entrada del oxígeno, agua o iones a la superficie del metal, resultando eficaz debido a su impermeabilidad frente a estos agentes corrosivos, dado que inhibe la reacción catódica del proceso corrosivo. Todas las películas orgánicas son permeables en cierto grado al oxígeno y al agua, los cuales son elementos fundamentales para el progreso de la corrosión metálica. Por esta razón la protección anticorrosiva mediante este mecanismo está limitada. Sin embargo, una correcta selección de las formulaciones, junto la determinación del adecuado espesor de recubrimiento, puede dar lugar a una buena inhibición de la corrosión. (Barrita, 2007)
- Inhibición: este mecanismo de protección anticorrosivo se genera por la presencia de componentes de naturaleza inorgánica (como el cromo hexavalente y trivalente) que actúan de algún modo impidiendo o retardando la reacción de corrosión. Su modo de actuación puede ser directo o indirecto. La acción directa corresponde a los inhibidores llamados solubles, que promueven el mantenimiento de una película superficial protectora de óxido sobre el metal. La acción indirecta la efectúan los inhibidores llamados básicos, que forman compuestos insolubles al reaccionar con productos o subproductos de la formulación. Lo que consigue el efecto de inhibición es polarizar los ánodos y/o cátodos de las pilas de corrosión que se forman, una vez que el electrolito se ha difundido a través del recubrimiento, reduciéndose por tanto la intensidad del proceso corrosivo. En ambos casos, la formación de una película pasivante dificulta el contacto metal – atmósfera. (Barrita, 2007).

El pigmento anticorrosivo más utilizado ha sido el cromato de zinc, el cual actúa por pasivación en el ánodo debido a su carácter oxidante. La capa formada consiste en óxidos mixtos férricos y crómicos. (Barrita, 2007)

- Composición de las soluciones pasivantes

La mayoría de los pasivados crómicos basan su composición en ácido crómico. A continuación se presenta

Tabla No. 1 Comparación técnica de diferentes soluciones pasivantes.

	Solución pasivante A	Solución pasivante B	Solución pasivante C
Concentración	7 – 10%	5 – 8%	15 – 25%
Apariencia en el producto final	Color verde	Color azul	Color gris metálico (característico del galvanizado)

Fuente: ProCoat (2012)

1.2.16. Ensayos de exposición a humedad

La capa pasiva en el acero galvanizado no queda correctamente formada si la superficie del recubrimiento galvanizado está cubierta por agua o si alguna causa impide que el anhídrido carbónico del aire no acceda libremente a la superficie galvanizada. Cuando se dan estas circunstancias, continúan formándose hidróxidos de zinc, los cuales genera unas manchas conocidas como manchas blancas o manchas de almacenamiento en húmedo.

Las manchas blancas suelen aparecer en ambientes húmedos, en donde puedan producirse condensaciones por efecto de la niebla o bajas temperaturas, durante el almacenamiento, apilando el material de tal manera que sus superficies queden en contacto estrecho. En este caso se genera una pila galvánica por aireación diferencial entre las zonas externas bien aireadas y las zonas internas donde el hidróxido de zinc se está formando, acelerando el proceso.

El ensayo de exposición de acero galvanizado, o mejor conocido como apilamiento húmedo, recrea una situación en la que varias muestras de acero galvanizado con protección pasiva se encuentra apilado, con agua entre cada pieza, y una lona o plástico recubriéndolo para que el aire húmedo quede retenido debajo de la cubierta, de forma que la humedad permanecerá sobre las muestras al estar restringida la

aireación debajo de la cubierta. De esta manera se simula una situación de almacenamiento inadecuado del material galvanizado, para evaluar el apareamiento de corrosión en las muestras de acero.

La prueba se realiza controlando el tiempo de exposición de las muestras a la condición de humedad, y se cuantifica el área de cada muestra afectada con óxido en m². (ATEG, 2017)

1.2.17. Ensayos de corrosión acelerada

El propósito de estos ensayos es acelerar en el laboratorio el comportamiento que sufre un producto en un ambiente natural. Este tipo de ensayos permite a los científicos e ingenieros estudiar, evaluar, analizar y mejorar los productos galvanizados.

El ensayo de niebla salina se basa principalmente en el pulverizado de una solución salina sobre las muestras a analizar. Para este procedimiento se utiliza una cámara con temperatura controlada. La solución salina generalmente utilizada es cloruro de sodio (NaCl) al 5%. Las muestras son introducidas dentro de la cámara y posteriormente pulverizadas con la solución. La cámara es cerrada, manteniendo una temperatura constante. En el tiempo en que las muestras permanecen dentro de la cámara están sujetas a una constante niebla de solución salina, por lo que son propensas constantemente a la corrosión.

Cuando el ensayo es aplicado a muestras de acero con recubrimiento metálico, como es el caso del acero galvanizado, el comportamiento de la corrosión debe ser evaluado de las siguientes formas:

- Número de horas hasta que la corrosión del acero se hace evidente.
- Número de horas hasta que 5% de la superficie está corroída.
- Número de horas hasta que 10% de la superficie está oxidada.

Sin embargo, la norma ASTM B117 establece que el método de evaluación de las muestras puede variar de acuerdo a la necesidad de la prueba y con previo acuerdo entre los involucrados.

El aparecimiento de manchas color blanco, significa que la capa pasiva aplicada a las muestras de acero galvanizada ha sido consumida, y la capa de zinc que recubre el acero negro ha comenzado a reaccionar con el oxígeno.

El aparecimiento de manchas color rojo, significa que la capa de recubrimiento de zinc ha sido consumida por la reacción de corrosión y que se está iniciando la corrosión del metal base.

Es importante recalcar que para esta prueba no existe un mejor criterio de desempeño. Simplemente depende de lo que el usuario define como falla. (GalvInfoNote 3.4, 2007)

1.2.18. Deposición de cromo en producto terminado

La deposición o depositación, es el término utilizado para cuantificar la cantidad de una solución o producto depositada sobre la superficie de un objeto denominado sustrato. En el caso del presente estudio la deposición expresa la cantidad de solución pasivante aplicada a una muestra de acero.

1.2.19. Espectrometría de absorción atómica

Se define la espectrometría de absorción atómica como un método analítico que determina elementos presentes en pequeñas cantidades y que se basa fundamentalmente en la absorción de radiación por parte de átomos libres.

En la espectrometría atómica las muestras, generalmente en disolución, son vaporizadas a unas temperaturas entre 2000 – 6000 K, midiéndose la capacidad que dichos átomos tienen para absorber radiación de una determinada longitud de onda (absorción) o bien la capacidad de emisión de radiación de dichos átomos (emisión o fluorescencia).

La espectrometría de absorción atómica se basa en la absorción de radiación por parte de átomos o iones elementales. Las regiones del espectro que proporcionan más información atómica son la ultravioleta/visible y la de rayos X.

En la espectrometría atómica lo ideal es que los átomos estén libres de la influencia de la matriz, lo cual implica que no estén enlazados a otros átomos, de modo que todas las partículas, moléculas y compuestos deben estar disociados. Esto se

consigue atomizando correctamente la muestra a analizar. Los métodos de atomización principales son los hornos y las llamas. Las llamas son formadas por una combinación de gases, oxidante y combustible, para atomizar muestras en estado líquido y en disolución.

- Desarrollo del ensayo: durante el ensayo, la muestra es pulverizada dentro de la llama en forma de un aerosol generado por un nebulizador. Esto hace que sea posible la introducción de muestras sólidas y suspensiones directamente dentro de la llama. Los oxidantes más usados son el aire y el dióxido de nitrógeno, y en el caso de los combustibles el acetileno, el propano y el hidrógeno. En el proceso de atomización el combustible, el oxidante y la muestra aspirada se mezclan a través del nebulizador y se obtiene una fina niebla. Dicha niebla es llevada a una cámara de burbujeo donde se rompen las gotas en pequeñas partículas que quedarán en suspensión en el gas, denominadas aerosol, y su formación en nebulización. El aerosol, el oxidante y el combustible pasan a través de un deflector, que además de producir la mezcla sirve para eliminar las gotas de mayor tamaño. El exceso de líquido se recoge en la cámara de spray y se elimina. El aerosol que llega a la llama contiene aproximadamente un 5% de la muestra inicial.

Una vez atomizada la muestra, los átomos absorben la radiación emitida por una lámpara, normalmente de cátodo hueco, aunque también puede ser de descarga de electrodos, que emite en la radiación característica del elemento a determinar. Todo esto previo al paso de esta radiación por un sistema de monocromación en el que se selecciona una estrecha banda de longitudes de onda. Por último, se detecta la señal mediante un detector. Finalmente, mediante la relación absorbancia/concentración recogida en la ley de Lambert – Beer se calcula la concentración del analito de estudio.

- Interferencias del ensayo: las interferencias pueden ser químicas, que son las producidas por la existencia de componentes de la muestra que provocan una disminución de la atomización del analito. También existen interferencias físicas, debidas a las características que presenta la disolución de la muestra,

temperatura, viscosidad y tensión superficial, que pueden influir en el proceso de nebulización y transporte de la muestra. (Santiago, R. 2007)

1.2.20. Diagrama causa – efecto

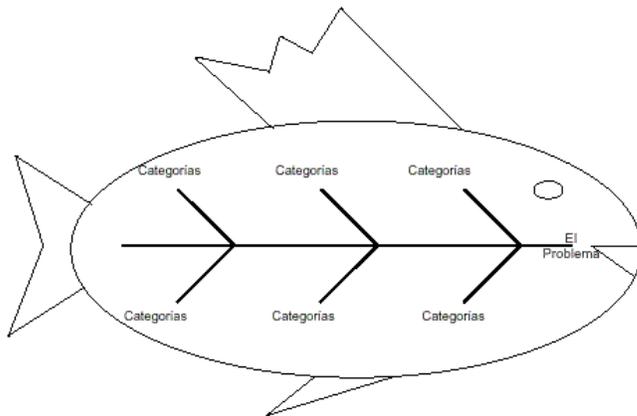
El diagrama causa y efecto es la representación de varios elementos de un sistema que pueden contribuir a un problema. Fue desarrollado en 1943 por el profesor Kaoru Ishikawa en Tokio. Algunas veces es denominado diagrama Ishikawa o Diagrama Espina de Pescado por su parecido con el esqueleto de un pescado. Es una herramienta muy utilizada y efectiva para estudiar procesos y para desarrollar un plan de recolección de datos.

Para utilizar el diagrama causa y efecto es necesario identificar un problema y sobre éste realizar una lluvia de ideas de las posibles causas. El diagrama ayuda a clasificarlas y tener una mejor concepción del panorama, del problema y las acciones que se tomarán. (C&TA, 2016)

Generalmente, se utilizan las siguientes categorías:

- Hombre
- Máquina
- Entorno
- Material
- Método
- Medida

Figura No. 39 Diagrama causa – efecto



Fuente: C&TA (2016)

1.2.21. Terminología estadística

- Desviación estándar: es el promedio de la distancia de los valores obtenidos respecto al promedio.

Figura No. 40 Ecuación desviación estándar

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}}{n - 1}$$

En donde:

x_i = valor de una medición

X = promedio de la totalidad de las mediciones

n = número de mediciones

- Gráfica de control: una gráfica de control es un diagrama que sirve para examinar si un proceso se encuentra en una condición estable, o para asegurar que se mantenga en esa condición. Un proceso es estable cuando las únicas causas de variación presentes son las de tipo aleatorio, condición en la cual se pueden hacer inferencias respecto a las salidas del proceso en la característica que se esté midiendo.

La estructura de las gráficas contiene una línea central (LC), una línea superior que marca el límite de control superior (LCS) y una línea inferior que marca el límite de control inferior (LCI). Los puntos contienen información sobre las lecturas hechas; estas pueden ser promedios de grupos de lecturas, o sus rangos, o bien las lecturas individuales mismas. Los límites de control marcan el intervalo de confianza en el cual se espera que caigan los puntos.

Figura No. 41 Ecuación para el cálculo del límite de control superior para el gráfico de datos individuales.

$$LCS_x = \mu_x + 3\sigma_x = \bar{X} + 3 \frac{\overline{Rm}}{d_2}$$

Figura No. 42 Ecuación para el cálculo del límite de control central para el gráfico de datos individuales.

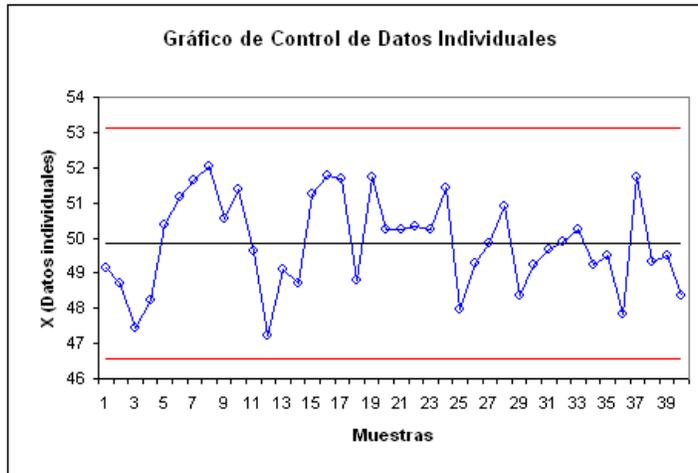
$$LC_x = \mu_x$$

Figura No. 43 Ecuación para el cálculo del límite de control inferior para el gráfico de datos individuales.

$$LCI_x = \mu_x - 3\sigma_x = \bar{X} - 3 \frac{\overline{Rm}}{d_2}$$

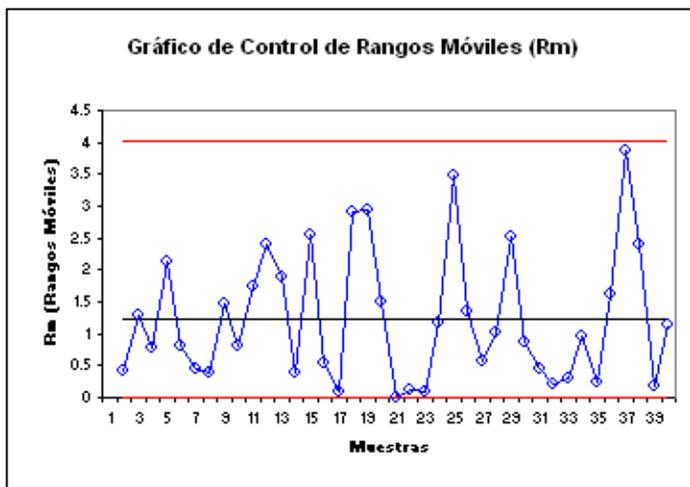
Para la evaluación del proceso en estudio se tienen datos de mediciones individuales, por lo cual se eligió una gráfico tipo X – Rm.

Figura No. 44 Gráfico de control de datos individuales.



Fuente: Hernández (2009)

Figura No. 45 Gráfico de control de rangos móviles.



Fuente: Hernández (2009)

Esta gráfica es utilizada cuando las mediciones son individuales debido a que los tiempos de los ciclos de producción son largos. Para el caso de la gráfica de rango móvil, los límites de control se calcularán:

Figura No. 46 Ecuación para el cálculo del límite de control superior para gráfico de rangos móviles.

$$LCS_{Rm} = D_4 \overline{Rm}$$

Figura No. 47 Ecuación para el cálculo del límite de control central para gráfico de rangos móviles.

$$LC_{Rm} = \bar{R}$$

Figura No. 48 Ecuación para el cálculo del límite de control inferior para gráfico de rangos móviles.

$$LCI_{Rm} = D_3 \bar{Rm}$$

Figura No. 49 Ecuación para el cálculo del rango móvil.

$$Rm = |X_n - X_{n-1}|$$

Para el cálculo es posible utilizar la tabla de constantes para gráficos de control, para el caso en el que el rango móvil se calcula sobre dos valores consecutivos, en donde se tiene que $3/d_2=2.6596$, $D_3=0$ y $D_4=3.267$. (Hernández, M. 2009)

- Media: también se llama media aritmética: es la cantidad total de la variable medida, distribuida en partes iguales entre cada observación.

Figura No. 50 Ecuación de la media aritmética

$$X = \frac{\sum^n x_i}{n}$$

En donde:

X_i = valor de una medición

n = número de mediciones

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La corrosión es la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre. Si bien esta fuerza destructiva ha existido siempre, el interés por retardarla ha aumentado en los tiempos modernos, como efecto de los avances de la civilización. El desarrollo de los métodos de extracción y uso de los combustibles, muy especialmente del petróleo, así como la expansión de la industria química, han modificado la composición de la atmósfera de los centros industriales y de las aglomeraciones urbanas. (ILCE, 2017)

La producción de acero y la mejora de sus propiedades mecánicas han hecho posible su empleo en los dominios más variados. Sin embargo, el desarrollo en la utilización de los productos siderúrgicos va acompañado, paralelamente, de un aumento en su vulnerabilidad a la corrosión. Según estudios realizados, se estima que un 25% de la producción anual de acero es destruida por la corrosión. (ILCE, 2017)

La corrosión es un fenómeno natural y sucede espontáneamente, los daños que produce afectan la vida útil del material y por lo tanto de la construcción de la cual forma parte. Durante años los humanos han desarrollado distintas formas de proteger el acero contra la acción de la corrosión. (Asrar, 2016)

La forma más utilizada de proteger el acero es con el uso de zinc. El uso de zinc como protección es uno de los sistemas de protección contra la corrosión más económicos y exentos de mantenimiento disponibles. Sin embargo existe la posibilidad de que el revestimiento reaccione con el entorno, produciendo una reacción de oxidación del zinc. Si bien el acero base no es afectado gracias a la protección del recubrimiento de zinc, es posible apreciar una mancha producto de la oxidación de este. Esta afectación superficial y estética a los productos de acero galvanizado crea la necesidad de utilizar una protección que impida la oxidación del zinc, por lo que se utiliza el proceso de pasivación. (AGA, 2017)

La pasivación es la formación de capas superficiales sobre un metal, el cual queda protegido de los agentes químicos agresivos, por lo general, esta capa son óxidos del metal que se está protegiendo. A pesar de que el proceso químico de pasivación a base

de cromo proporciona resistencia contra la corrosión en el acero galvanizado, existe una búsqueda constante de aumentar la vida útil del producto para ofrecer a los consumidores mayor durabilidad. Es por esto que una empresa productora de acero galvanizado en Guatemala comprometida con brindar un servicio de alta calidad a sus clientes y superar sus expectativas, desea evaluar su proceso de pasivación por medio del ácido pasivante que utiliza en su proceso productivo, para determinar la resistencia a la corrosión de su producto terminado. Asimismo, con la intención de superar las expectativas de los clientes y diferenciarse del mercado, ha implementado dos alternativas de ácido pasivante, las cuales se caracterizan por contener una concentración distinta.

Ante la gama de alternativas de concentración de ácidos pasivantes para la producción de acero galvanizado con protección pasiva, se evaluó la aplicación y el desempeño de cada una de ellas con el fin de establecer una comparación y conocer la efectividad que estas tienen en el producto terminado.

Ante el deseo de innovación y lucha constante en cumplir con la satisfacción del cliente y superar sus expectativas, se formula la siguiente interrogante: ¿Cuál de las 3 alternativas de concentración de solución pasivante proporciona una mayor resistencia a la corrosión?

2.1. Objetivos

2.1.1. Objetivo general

Confirmar la efectividad de un proceso de pasivación de acero galvanizado, utilizando tres rangos diferentes de concentración de ácido pasivante, para determinar la resistencia a la corrosión del producto terminado con cada uno de ellos y establecer el que tenga el mejor desempeño.

2.1.2. Objetivos específicos

- Determinar los factores del proceso de pasivación de acero galvanizado que tengan incidencia directa en la resistencia a la corrosión del producto terminado, para evaluar cada uno de ellos.
- Determinar la deposición de solución pasivante en el producto terminado.
- Evaluar la resistencia a la corrosión del producto terminado con cada solución pasivante utilizada, ante condiciones de almacenamiento por medio de un ensayo de apilamiento húmedo.
- Evaluar la resistencia a la corrosión del producto terminado con cada solución pasivante utilizada, ante condiciones atmosféricas aceleradas por medio de un ensayo normado de niebla salina.

2.2. Variables

2.2.1. Variables independientes

- Temperatura ambiente definida para el estudio.
- Humedad del ambiente definida para el estudio.
- Concentración de ácido pasivante a utilizar.
- Tiempo de exposición del producto terminado a ensayo de apilamiento húmedo.
- Tiempo de exposición del producto terminado a ensayo de niebla salina.

2.2.2. Variables dependientes

- Deposición de pasivante en el producto terminado.
- Comportamiento del producto terminado ante ensayo de apilamiento húmedo.
- Comportamiento del producto terminado ante ensayo de niebla salina.

2.3. Definición de las variables

2.3.1. Variables independientes

- Temperatura ambiente definida para el estudio.

Conceptual: temperatura es una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, y cuya unidad en el sistema internacional es el kelvin (K). Estudio es una obra de cierta extensión en que se expone y analiza una cuestión determinada.

Operacional: se estableció un rango de temperatura ambiente bajo el cual se realizó el estudio y evaluación de los resultados obtenidos. Es expresada en grados Celsius (°C).

- Humedad del ambiente definida para el estudio.

Conceptual: humedad es la expresión porcentual de la cantidad de vapor de agua presente en el aire con respecto a la máxima posible para unas condiciones dadas de presión y temperatura. Estudio es una obra de cierta extensión en que se expone y analiza una cuestión determinada. (RAE, 2017)

Operacional: se estableció un rango de humedad del ambiente en el que se realizó el estudio y la evaluación de los resultados obtenidos. Es expresada en porcentaje (%).

- Concentración de ácido pasivante a utilizar.

Conceptual: concentración es magnitud que expresa la cantidad de una sustancia por unidad de volumen. Ácido es una sustancia que en disolución aumenta la concentración de iones hidrógeno y que se combina con las bases para formar sales. Pasivar es tratar la superficie de un metal para formar una capa protectora contra la corrosión. (RAE, 2017)

Operacional: se utilizaron tres distintos rangos de concentraciones de ácidos pasivantes dentro del proceso productivo de pasivación de acero galvanizado. Se expresa en porcentaje (%).

- Tiempo de exposición del producto terminado a ensayo de apilamiento húmedo.

Conceptual: tiempo es la duración de las cosas sujetas a mudanza. Exposición es colocar algo metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma. Producto es una cosa producida. Terminado es la conclusión de una obra. Ensayo es un proceso para evaluar. Apilar es poner una cosa sobre otra haciendo pila. Húmedo es impregnado de agua o de otro líquido. (RAE, 2017)

Operacional: el tiempo de exposición del producto terminado en las pruebas de apilamiento húmedo corresponde al tiempo que pasaron las muestras de acero galvanizado con las distintas soluciones pasivantes en la prueba, desde el momento en que estas son colocadas hasta el momento en que esta terminó, haciendo las respectivas notaciones de las revisiones periódicas. Es expresado en días.

- Tiempo de exposición del producto terminado a ensayo de niebla salina.

Conceptual: tiempo es la duración de las cosas sujetas a mudanza. Exposición es colocar algo metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma. Producto es una cosa producida. Terminado es la conclusión de una obra. Ensayo es un proceso para evaluar. Niebla es una nube muy baja, que dificulta la visión según la concentración de las gotas que la forman. Salina es que contiene sal. (RAE, 2017)

Operacional: el tiempo de exposición del producto terminado en la prueba de niebla salina corresponde al tiempo que pasaron las muestras de acero galvanizado con las distintas soluciones pasivantes en la prueba, desde el momento en que estas son colocadas en la prueba hasta el momento en que esta terminó, haciendo las respectivas notaciones de las revisiones periódicas. Es expresado en horas.

2.3.2. Variables dependientes

- Deposición de pasivante en el producto terminado.

Conceptual: deponer es depositar algo. Pasivar es tratar la superficie de un metal para formar una capa protectora contra la corrosión. Producto es una cosa producida. Terminado es la conclusión de una obra. (RAE, 2017)

Operacional: la deposición de pasivante es la cantidad en g/m^2 de cada solución pasivante utilizada con que cuenta el producto final para resistir el ataque de la corrosión.

- Comportamiento del producto terminado ante ensayo de apilamiento húmedo.

Conceptual: comportamiento es manera de comportarse. Producto es una cosa producida. Terminado es la conclusión de una obra. Ensayo es proceso para evaluación. Apilar es poner una cosa sobre otra haciendo pila. Húmedo es impregnado de agua o de otro líquido. (RAE, 2017)

Operacional: el comportamiento es el óxido que se produce en la superficie del producto terminado a consecuencia del ensayo de apilamiento húmedo, expresado en cm^2 .

- Comportamiento del producto terminado ante ensayo de niebla salina.

Conceptual: comportamiento es manera de comportarse. Producto es una cosa producida. Terminado es la conclusión de una obra. Ensayo es proceso para evaluación. Niebla es una nube muy baja, que dificulta la visión según la concentración de las gotas que la forman. Salina es que contiene sal. (RAE, 2017)

Operacional: el comportamiento es el óxido que se produce en la superficie del producto terminado a consecuencia del ensayo de niebla salina, expresado en cm^2 .

2.4. Alcances y límites

2.4.1. Alcances

A través de la evaluación del proceso de pasivación de acero galvanizado se logró determinar su efectividad en el producto terminado. Fue posible establecer el valor agregado que este proceso aporta a la producción de acero galvanizado y la necesidad de este en dicho proceso para brindar un producto de calidad y que cumpla con las necesidades del cliente.

Los parámetros con los que se evaluó el proceso fueron la concentración de ácido pasivante utilizado, la deposición de la solución, y la resistencia a la corrosión que esta proporciona al acero galvanizado ante condiciones de exposición acelerada, así como normales de almacenamiento.

Asimismo, se evaluó la alternativa de utilizar dos alternativas de ácido pasivante, variando la concentración, para determinar si esta proporciona la resistencia a la corrosión necesaria en el acero galvanizado. Se realizaron los análisis respectivos del proceso de pasivación, con el fin de establecer una comparación entre las distintas concentraciones utilizadas. Además, se varió la deposición aplicada al producto terminado, dentro límites previamente establecidos, para establecer la dependencia de esta con el comportamiento del producto final ante la corrosión. Se llevaron a cabo las pruebas de corrosión en el laboratorio para evaluar los resultados obtenidos, las cuales permitieron un acercamiento a normas regulatorias.

2.4.2. Límites

Entre las limitaciones del presente trabajo de graduación se encuentra la confidencialidad de la empresa en donde se desarrolló el estudio, por lo cual se reserva el nombre de dicha empresa y su ubicación, marcas y especificaciones de insumos utilizados, fichas técnicas o especificaciones de materias primas y productos terminados, marca y especificaciones técnicas de maquinaria, así como nombres de trabajadores y colaboradores involucrados en el proceso productivo. También se tomó en cuenta la limitante de colocar fotografías del lugar de trabajo, laboratorio, planta de producción y aquellas que revelaran información confidencial.

El estudio realizado abarcó el proceso de pasivación, y la evaluación del producto terminado con el método convencional con pasivante a base de cromo, así como la utilización de dos alternativas de ácido pasivante en el cual se varió el rango de concentración utilizado. Sin embargo, es importante resaltar el hecho que se excluye del estudio el proceso de galvanización y el efecto del recubrimiento con zinc sobre el acero negro. Asimismo se excluyen los datos económicos de las formulaciones utilizadas por considerarse como información confidencial y no ser el fin primordial de este estudio.

Se excluye del presente estudio la utilización de técnicas electroquímicas como práctica para la evaluación de las distintas concentraciones de ácido pasivante utilizadas.

Para la evaluación del proceso se utilizaron tres distintas concentraciones de ácido pasivante, la deposición de cada una de estas soluciones sobre el acero galvanizado y su respectiva resistencia ante la corrosión, excluyendo de esta forma la variación de los parámetros de operación de las maquinarias como temperatura de secado y velocidad de aplicación, debido a la imposibilidad de modificar el proceso productivo de la empresa en estudio.

La experimentación del presente estudio debió ser ajustada a los tiempos de producción de la empresa galvanizadora, así como al laboratorio de calidad. Por lo tanto, algunas pruebas y fechas planificadas debieron ser coordinadas y reprogramadas para poder cumplir con los objetivos y realizarlos de la mejor forma.

El presente estudio se limitó a ser evaluado en las condiciones descritas en el Anexo A, bajo las cuales se llevó a cabo la experimentación y bajo las cuales fueron evaluados los resultados.

2.5. Aporte

El trabajo de graduación realizado permitió poner en práctica conocimientos de la carrera de Ingeniería Química Industrial ya que integró teoría del área de química básica con el área industrial para realizar la evaluación del proceso de pasivación como parte de un proceso productivo y con el área profesional para coordinar y llevar a cabo las pruebas de evaluación de los productos terminados en la empresa en estudio.

Durante la realización de la metodología fue posible poner en práctica conocimientos adquiridos en el área de laboratorio de control de calidad, y aprender nuevas técnicas propias de la industria aplicadas al sujeto de estudio. El proceso investigativo, experimental y los resultados alcanzados complementaron el estudio universitario ya que permitieron un acercamiento a la industria y enriquecieron el área laboral al proporcionar nuevas herramientas que podrán ser utilizadas en el futuro.

A la industria guatemalteca y centroamericana productora de acero galvanizado, aporta una herramienta de análisis que constituye una base teórica y práctica para tomar en cuenta en el tema de protección de acero contra la corrosión.

A la empresa en donde se realizó el estudio, aporta los resultados obtenidos y las conclusiones alcanzadas como herramienta técnica para evaluar la utilización de sus diferentes concentraciones en el tratamiento de pasivado, así como la deposición a utilizar en su proceso de producción de acero galvanizado garantizando alta calidad. Asimismo aporta las herramientas necesarias para argumentar y soportar la calidad de sus productos ante el entorno competitivo y sus clientes.

Al usuario final de productos de acero galvanizado, constituye una herramienta para poder conocer y comprender el comportamiento de dichos productos ante el ambiente para poder adquirirlos de mejor forma.

A los futuros estudiantes de la carrera de Ingeniería Química Industrial y afines, aporta una fuente de investigación y guía para el estudio de procesos productivos de acero y su protección ante la corrosión.

A la Universidad Rafael Landívar, aporta una fuente de datos teóricos y experimentales sobre una alternativa nueva utilizada en la industria del acero.

3. MÉTODO

Para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación se tomó como punto de estudio un proceso de pasivación de acero galvanizado, como parte de un proceso productivo. En dicho proceso se evaluó la aplicación de tres soluciones de ácido pasivante y sus respectivos productos terminados. Cada una de estas soluciones se diferencia por poseer un rango distinto de concentración.

Asimismo se realizaron las respectivas pruebas de corrosión para una muestra de acero galvanizado sin ninguna solución pasivante, con el fin de tener un punto de referencia y comparación de la acción del proceso de pasivación sobre el galvanizado con zinc.

Para realizar las pruebas al producto con las distintas concentraciones fue necesario conocer el proceso de preparación y aplicación de cada una de ellas. Cada ácido pasivante que es aplicado a la línea productiva cuenta con un paso previo de dilución en el cual se aplica un solvente que permite preparar la solución con la concentración deseada. Para preparar la solución con la mayor concentración se utiliza agua como solvente y para la preparación de las dos concentraciones menores de ácido se utiliza un pigmento de color verde y azul como solvente. Una vez preparadas las soluciones con sus respectivas concentraciones son aplicadas al proceso productivo.

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de calidad con el fin de controlar las condiciones de operación y obtener resultados verídicos sobre el efecto del proceso de pasivación sobre el acero galvanizado ante el ataque de la corrosión.

3.1. Sujetos y unidades de análisis

Para la realización del presente trabajo se obtuvo información de distintas fuentes, las cuales se describen a continuación.

3.1.1. Sujeto

- Acero galvanizado: el acero galvanizado constituyó el sujeto de estudio para la evaluación de la efectividad de la protección pasiva, aplicando tres diferentes soluciones pasivantes.

3.1.2. Unidades de análisis

Como unidades de análisis se tienen los elementos que dieron origen a las evaluaciones y ensayos correspondientes:

- Ácido pasivante A: rango de concentración 7 – 10%.
- Ácido pasivante B: rango de concentración 5 – 8%.
- Ácido pasivante C: rango de concentración de 15 – 25%
- Deposición de los ácidos pasivantes aplicados: evaluación de la incidencia de la cantidad de solución aplicada al acero galvanizado en la resistencia a la corrosión.
- Acero galvanizado sin pasivante: se evaluó una muestra de acero galvanizado sin ninguna solución pasivante aplicada para ejemplificar la corrosión del zinc sin ninguna protección.
- Óxido blanco en el acero evaluado: evaluación del comportamiento del acero y la formación de óxido a través del tiempo del ensayo.

3.2. Instrumentos

A continuación se detallan las especificaciones sobre el equipo, utensilios y reactivos utilizados durante la realización del trabajo de investigación.

Tabla No. 2 Cristalería utilizada

Cristalería	Imagen	Descripción y capacidad	Uso
Beacker		Capacidad máxima 250 ml	Utilizado para preparar soluciones químicas.
Pipeta		Capacidad máxima 25 ml Incertidumbre: ± 0.05 ml	Utilizada para preparar soluciones.
Probeta		Capacidad máxima 100 ml Incertidumbre: ± 0.5 ml	Utilizado para mediciones y preparación de soluciones.

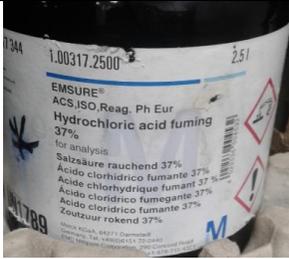
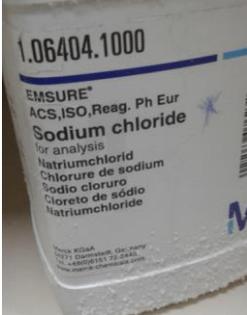
Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 3 Equipos utilizados

Equipo	Imagen	Descripción y capacidad	Uso
Balanza analítica		Tipo: electrónico Modelo: Ex 423 Máximo alcance: 420 g Incertidumbre: ± 0.0005 g	Utilizada para pesar muestras de acero y reactivos.
Campana de extracción de gases		Extracción 0.9 m/s	Utilizada para realizar soluciones en el laboratorio
Cámara de niebla salina		Modelo: Q-Fog/SSP600 Presión máxima de rociado de aire: 30 psi	Utilizada para realizar ensayo de niebla salina.

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 4 Reactivos utilizados

Reactivo	Imagen	Uso
Ácido clorhídrico		Ensayo de determinación de cromo en lámina.
Cloruro de sodio		Utilizado para la elaboración de la solución salina para el ensayo de niebla salina.
Agua desmineralizada		Utilizada para realizar soluciones en el laboratorio, y la realización del ensayo de apilamiento húmedo.
Metil etil cetona		Ensayo de determinación de deposición de pasivante de color en lámina galvanizada.

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 5 Utensilios e instrumentos utilizados

Utensilio/ instrumento	Imagen	Uso
Tijera para acero		Utilizada para cortar las muestras de acero.
Maskin tape		Utilizado para cubrir las orillas de las muestras de acero.
Tape		Utilizado para sellar los paquetes de muestras en ensayo de apilamiento húmedo.
Tijeras		Utilizadas para cortar materiales (nylon, maskin tape, tape, etc.).
Marcador permanente		Utilizado para identificar muestras.
Peso		Utilizado para presionar las muestras en ensayo de apilamiento húmedo.
Metro		<p>Utilizado para mediciones en la realización de muestras de acero.</p> <p>Capacidad máxima de medición 8 m. Incertidumbre: ± 0.0005 m</p>

Utensilio/ instrumento	Imagen	Uso
Toallas extender		Utilizado para secado y limpieza de las muestras y utensilios.
Wipe		Utilizado para secado de las muestras de acero luego de aplicar reactivos.
Perilla de succión		Utilizada para preparación de soluciones.
Micrómetro		Utilizado para medición de espesores del acero. Incertidumbre: 5×10^{-6} m
Nylon		Utilizado para el empaque de las muestras de acero en prueba de apilamiento húmedo.
Piseta		Utilizada para verter agua sobre las muestras de acero en prueba de apilamiento húmedo.
Lentes de seguridad		Utilizados para protección de los ojos en el laboratorio.

Utensilio/ instrumento	Imagen	Uso
Guantes de seguridad		Utilizados para protección de manos en el manejo de los productos de acero.
Guantes clínicos		Utilizados para protección de manos en el laboratorio.
Papel pH		Utilizado para medir el pH de la solución salina aplicada en el ensayo de niebla salina.

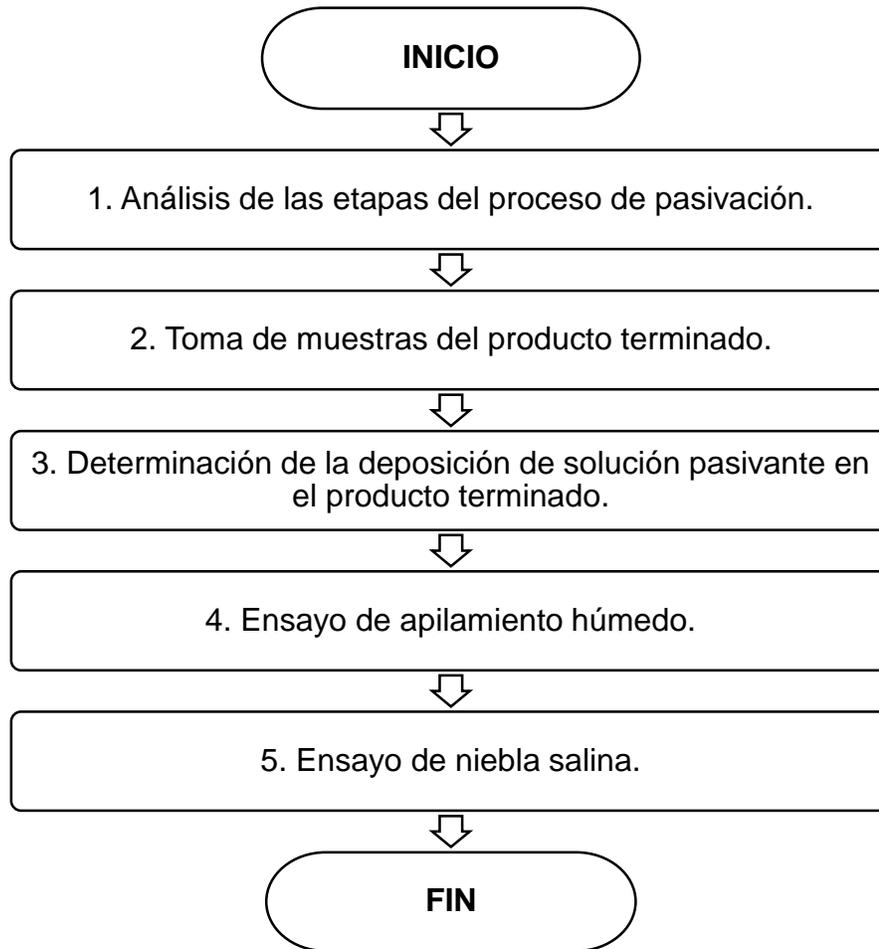
Fuente: elaboración propia.

3.3. Procedimiento

3.3.1. Diagrama general

Figura No. 51 Proceso general de realización del trabajo de graduación.

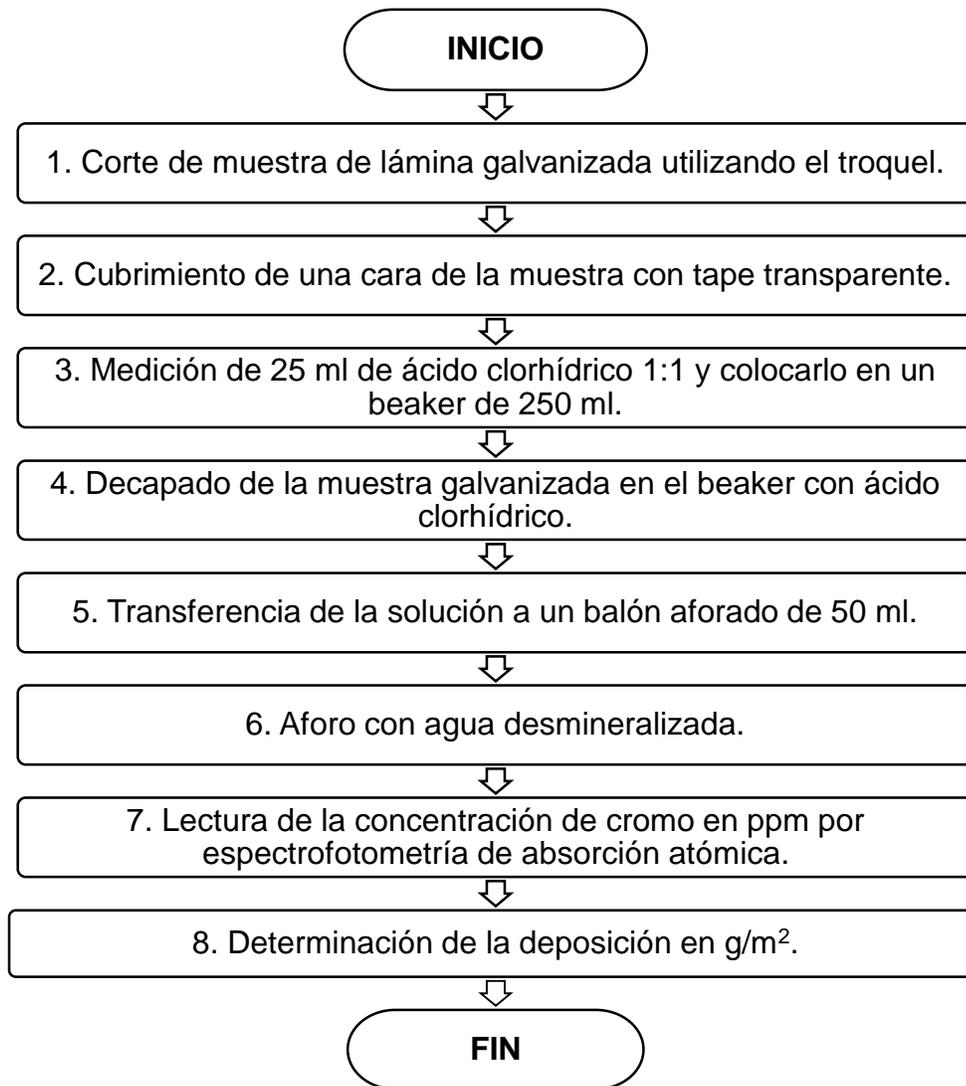
Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza



3.3.2. Diagramas específicos

Figura No. 52 Proceso de determinación de cromo total en lámina galvanizada

Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza



Descripción de determinación de cromo total en lámina galvanizada:

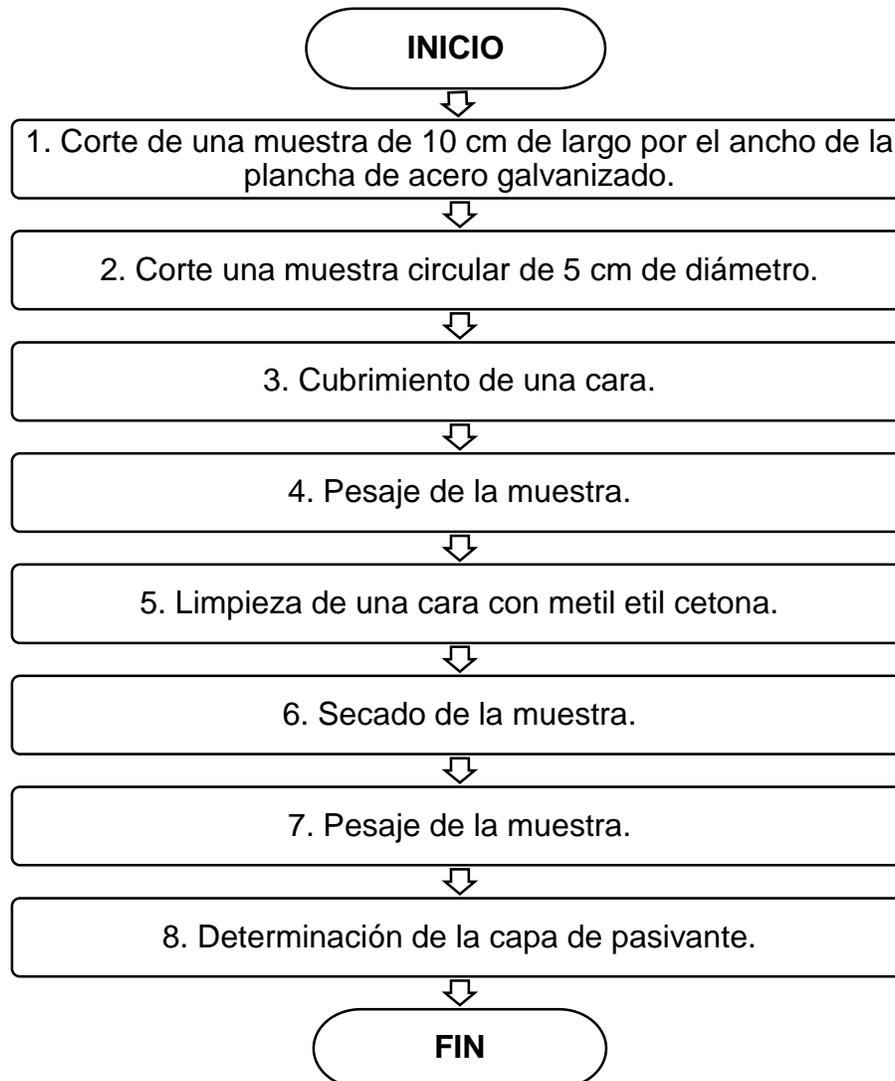
1. Corte de una muestra de lámina galvanizada utilizando el troquel: se cortó una muestra circular de lámina galvanizada con pasivante crómico.
2. Cubrimiento de una cara de la muestra con tape transparente: se cubrió una cara con tape transparente para poder realizar la medición de concentración de cromo por cada cara de la lámina.
3. Medición de 25 ml de ácido clorhídrico 1:1 y colocarlo en un beaker de 250 ml: se realizó la solución de ácido clorhídrico con agua en proporción 1 a 1 y se vertió en un beaker. Esto se realizó en la campana de extracción de gases.
4. Decapado de la muestra galvanizada en el beaker con ácido clorhídrico: se introdujo la muestra en el ácido con el fin de remover toda la capa recubriente del acero negro.
5. Transferencia de la solución a un balón aforado de 50 ml: la solución obtenida luego de decapar la muestra se transfirió a un balón aforado.
6. Aforo con agua desmineralizada: se vertió agua desmineralizada en el balón hasta llegar a la marca aforada y completar 50 ml.
7. Lectura de la concentración de cromo en ppm por espectrofotometría de absorción atómica: se utilizó la técnica de absorción atómica para determinar la concentración de cromo presente en el pasivante crómico y en el pasivante acrílico, en partes por millón (ppm).
8. Determinación de la deposición en g/m^2 : con el dato obtenido en partes por millón, utilizar la siguiente ecuación.

Figura No. 53 Conversión de deposición de pasivante de ppm a g/m^2 .

$$\frac{\text{g}}{\text{m}^2} = (\text{ppm})(0.02546)$$

Figura No. 54 Proceso de determinación de deposición de pasivante en lámina galvanizada

Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza



Descripción de cuantificación de la capa de galvanizado:

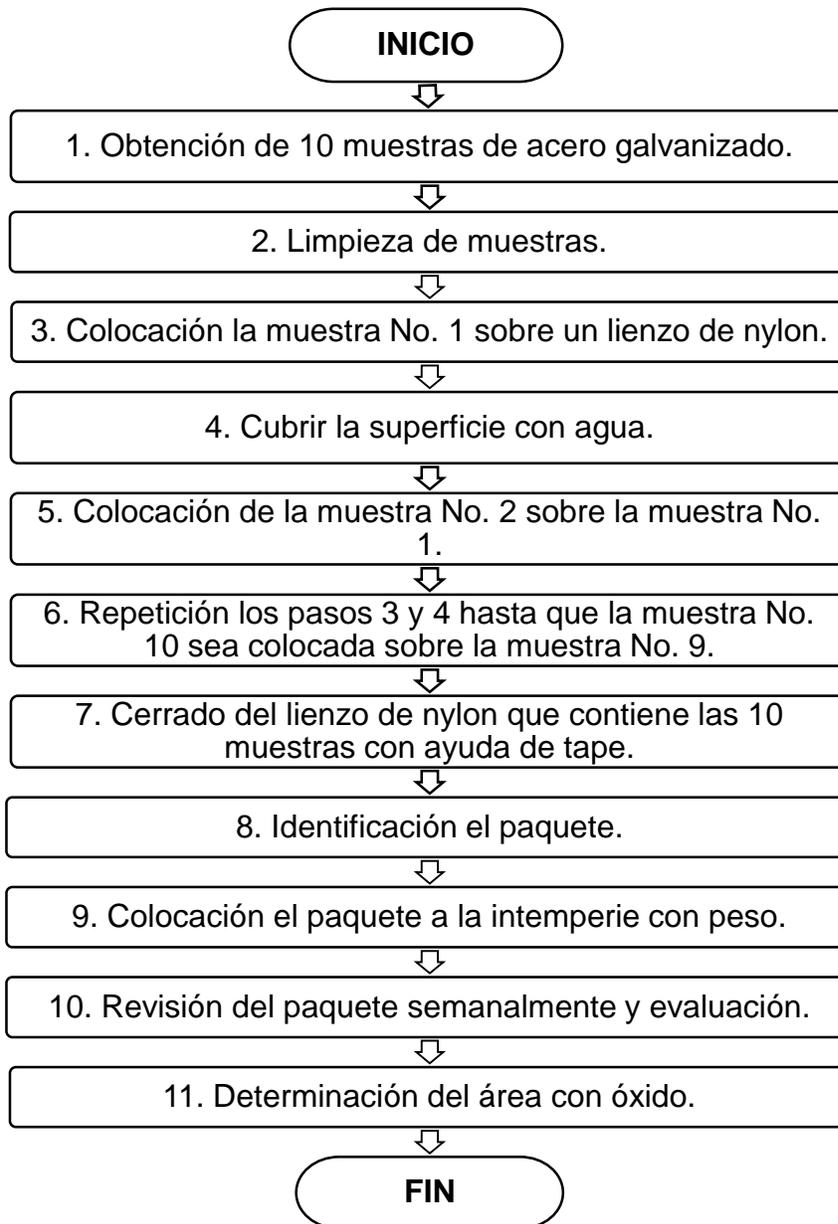
1. Corte de una muestra de 10 cm de largo por el ancho de la plancha de acero galvanizado: se utilizó una muestra de acero galvanizado para extraer una tira de 10 cm de largo y dejando el ancho original, con ayuda de una guillotina.
2. Corte de una muestra circular de 5 cm de diámetro: con la tira obtenida se utilizó el troquel ubicado en el laboratorio de control de calidad para obtener el corte.
3. Cubrimiento de una cara: se utilizó tape transparente para cubrir una de las caras de la muestra circular. Esto se realizó para determinar la cantidad de pasivante que tiene el acero galvanizado.
4. Pesaje de la muestra: con ayuda de una balanza analítica se pesó la muestra circular de acero galvanizado y se anotó el peso en una libreta como “peso1”.
5. Limpieza de una cara con etil metil cetona: en la campana de extracción de gases, se utilizó un wipe con metil etil cetona para frotar la cara descubierta de la muestra y remover todo el pasivante de color.
6. Secado de la muestra: se dejó la muestra al descubierto durante unos minutos en la campana de extracción de gases para asegurar su secado.
7. Pesaje de la muestra: con ayuda de una balanza analítica se pesó la muestra circular y se anotó el peso en una libreta como “peso2”.
8. Determinación de la capa de pasivante de color: con los datos obtenidos se utilizó la ecuación 11 para obtener la capa de pasivante.

Figura No. 55 Cálculo de la capa de pasivante en lámina galvanizada.

$$\text{Pasivante} = \frac{\text{peso1} - \text{peso2}}{\text{área}}$$

Figura No. 56 Proceso de ensayo de apilamiento húmedo

Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza

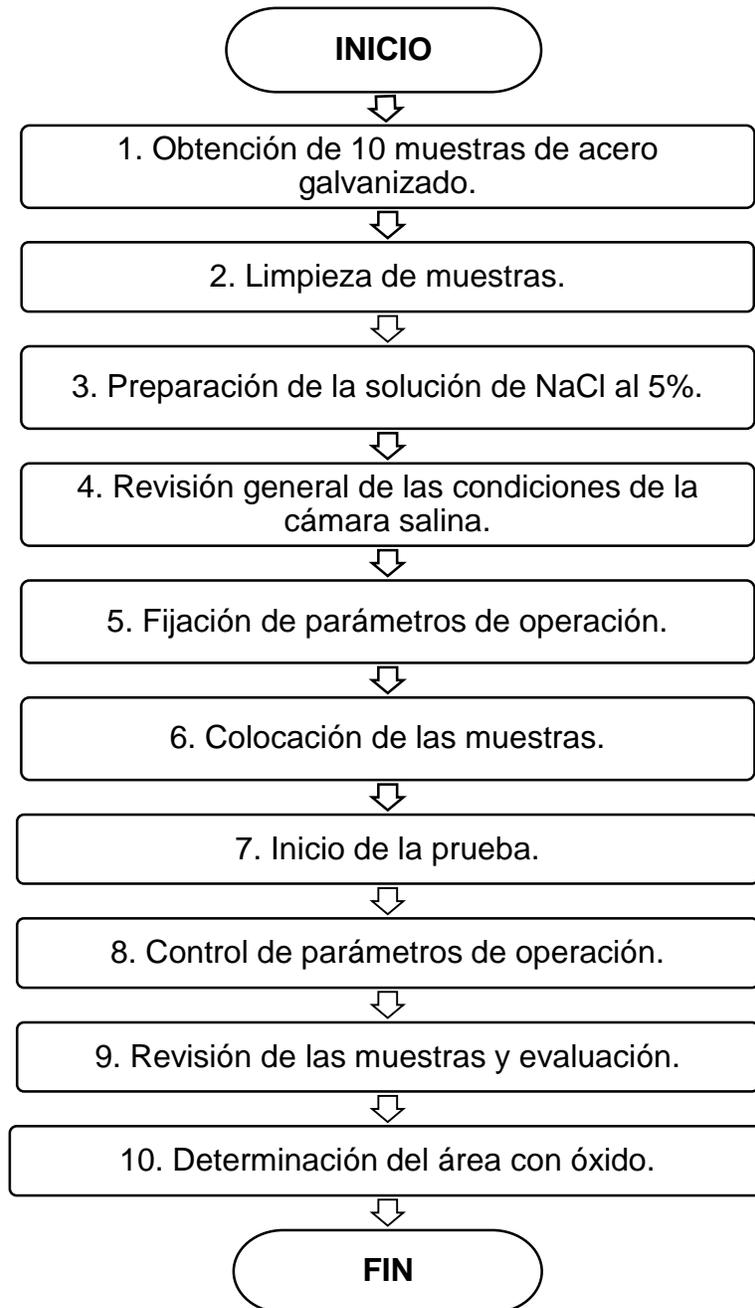


Descripción de ensayo de apilamiento húmedo:

1. Obtención de 4 muestras de acero galvanizado (para cada ensayo): se cortaron muestras de acero galvanizado en rectángulos de 10 x 15 cm. A estos rectángulos se les colocó maskin tape en las orillas para poder manipularlas sin riesgo de corte, así como evitar la exposición de los bordes de acero sin protección a la oxidación, ya que el punto de estudio es la superficie con protección.
2. Limpieza de muestras: se limpiaron las muestras con papel extender para eliminar cualquier impureza superficial.
3. Colocación de la muestra No. 1 sobre un lienzo de nylon: se utilizó nylon negro de aproximadamente 30 x 30 cm y se colocó la muestra No. 1 sobre él.
4. Cubrir la superficie con agua: con ayuda de una piseta, se cubrió con agua la superficie de la muestra.
5. Colocación de la muestra No. 2 sobre la muestra No. 1: Se colocó la muestra de forma que quedara apilada.
6. Repetición los pasos 3 y 4 hasta que la muestra No. 10 sea colocada sobre la muestra No. 9: Se apilaron todas las muestras cubriendo la superficie de cada una de ellas con agua desmineralizada con ayuda de una piseta.
7. Cerrado del lienzo de nylon que contiene las 10 muestras con ayuda de tape: se empacaron todas las muestras apiladas, sellando con tape para evitar filtración.
8. Identificación del paquete: se colocó una etiqueta al paquete con la fecha y hora de inicio del ensayo para poder medir correctamente el tiempo en horas.
9. Colocación del paquete a la intemperie con peso: una vez sellado el paquete con las muestras, se colocó a la intemperie, con un peso para evitar el movimiento del mismo, así como simular el peso que ejerce un paquete de láminas de acero galvanizado en almacenamiento.
10. Revisión del paquete semanalmente y evaluación: se abrió el paquete cada semana para examinar las muestras y evaluar el apareamiento de óxido blanco. Luego de la evaluación se volvió a sellar el paquete para dejar en reposo.

11. Determinación del área con óxido: se dejaron secar las muestras y luego se determinó el área que presentaba óxido blanco.

Figura No. 57 Proceso de ensayo de niebla salina
Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza



Descripción de ensayo de niebla salina:

1. Obtención de 3 muestras de acero galvanizado: se cortaron cuadrados de la plancha galvanizada proporcionada por la línea de producción, con dimensiones de 7.5 x 12.7 cm. A los cuadrados obtenidos se les colocó maskin tape en la orilla para evitar que el borde del acero sin protección sufra oxidación, ya que el sujeto de estudio es la superficie con protección.
2. Limpieza de muestras: se limpiaron las muestras con papel seco, evitando rayones y contaminación.
3. Preparación de la solución de NaCl al 5%: se preparó la solución utilizando agua desmineralizada y cloruro de sodio grado reactivo. Ésta solución se introdujo en el respectivo recipiente de la cámara salina.
4. Revisión general de las condiciones de la cámara salina: se verificó que el equipo no tuviera ningún objeto extraño que dificulte su operación.
5. Fijación de parámetros de operación: se fijó en la cámara salina la temperatura de operación a 35°C y tiempo de ciclo de 24 horas.
6. Colocación de las muestras: se colocaron las muestras dentro de la cámara con un ángulo de inclinación aproximadamente de 20% sobre la horizontal y paralelas a la dirección principal del flujo de niebla a través de la cámara. Éstas no tienen contacto entre sí. Finalmente se verificó que cada muestra tuviera toda su superficie expuesta a la niebla sin obstrucciones.
7. Inicio de la prueba: se cerró la cámara salina y se dio inicio a la prueba registrando la fecha y hora de realización.
8. Control de parámetros de operación: durante el transcurso de la prueba se revisaron los parámetros para verificar que no existiera ninguna alteración.
9. Revisión de las muestras y evaluación: una vez terminado el ensayo, se retiran las muestras, y se dejan secar para su evaluación.
10. Determinación del área con óxido: una vez secas las muestras, se determinó el área que presentaba óxido blanco.

3.4. Diseño y metodología estadística

3.4.1. Diseño experimental

Tabla No. 6 Experimentos, diseño experimental

Experimento	Nombre	Descripción	Tratamiento	Repeticiones
Experimento No. 1	Evaluación de las etapas del proceso de pasivación de acero galvanizado.	Se analizan las etapas del proceso productivo de la empresa en estudio para determinar los factores influyentes en la resistencia a la corrosión del producto final.	Diagrama de Ishikawa (causa-efecto) para determinar los factores críticos en el proceso.	Diferentes días de producción durante 4 semanas.
Experimento No. 2	Evaluación de calidad del producto terminado.	Medición de la deposición de pasivante aplicado en el producto terminado.	Espectrofotometría de absorción atómica para determinar la concentración de cromo total. Ensayo de deposición de pasivante en el producto terminado.	Triplicado.

Experimento	Nombre	Descripción	Tratamiento	Repeticiones
Experimento No. 3	Ensayo de apilamiento húmedo.	Exposición de las muestras a condiciones oxidantes y de almacenamiento en tiempo real.	Ensayo de apilamiento húmedo para evaluar las condiciones normales de exposición.	Triplicado, durante 28 días.
Experimento No. 4	Ensayo de niebla salina.	Exposición de las muestras a agentes oxidantes en condiciones aceleradas.	Ensayo normado de niebla salina para evaluar las condiciones aceleradas de exposición del producto terminado.	Triplicado, durante 170 horas.

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Cálculo del tamaño de muestra

Para llevar a cabo el estudio se calculó el tamaño de muestra representativa para el proceso de pasivación de acero galvanizado.

Para el cálculo se utilizó la fórmula de tamaño de muestra para una población infinita o desconocida debido a que se trata de un proceso productivo continuo en el cual no es posible hacer un conteo segmentado por lotes. Asimismo se tomó en cuenta que el estudio evalúa el proceso de pasivación para toda la producción de acero galvanizado, sin hacer distinción entre sus características propias del galvanizado, por lo que se considera la población como infinita ya que se generalizan los resultados para toda la producción.

Figura No. 58 Fórmula para el tamaño de muestra de una población infinita.

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{i^2}$$

En donde se define:

n = tamaño de la muestra

Z_{α} = valor correspondiente a la distribución de gauss según el intervalo de confianza deseado

p = prevalencia esperada del parámetro a evaluar

q = probabilidad de fracaso

i = error que se prevé cometer

Para efectos del presente estudio, se define un nivel de confianza del 90% ($\alpha = 0.10$). Se define una prevalencia esperada del parámetro a evaluar de 0.9 ya que se estima que la variable evaluada (oxidación) estará presente en la mayor parte de las muestras analizadas y se evalúa una mínima probabilidad de que exista el escenario en que las muestras no presenten dicha variable en el tiempo definido de ensayo. Se define también un error permitido del 20% por la introducción del factor humano y visual en el método de medición utilizado.

$$Z_{\alpha = 0.10} = 1.65$$

$$p = 0.9$$

$$q = 0.1$$

$$i = 20\%$$

Resolviendo:

$$n = \frac{(1.65)^2 \cdot 0.9 \cdot 0.1}{(0.2)^2}$$

$$n = 6.12$$

$$n \approx 6$$

Conociendo el número de muestra que es representativo para el proceso, se utilizó dicha cantidad de muestras para cada una de las soluciones pasivantes y luego se llevó a cabo los análisis respectivos. (Creative Research Systems, 2017)

3.4.3. Descripción de las unidades experimentales

- Proceso productivo de pasivación, se evaluaron las diferentes etapas que forman parte del proceso determinando cuales son aquellas que tienen un impacto en la resistencia a la corrosión del producto final.
- Producto terminado, se evaluó la cantidad de ácido pasivante aplicado en el acero galvanizado con cada una de las concentraciones.
- Muestras de acero galvanizado con protección pasiva, expuestas a ensayo de apilamiento húmedo, se evaluó el comportamiento del producto terminado con las diferentes concentraciones utilizadas ante la exposición a humedad.
- Muestras de acero galvanizado con protección pasiva, expuestas a ensayo de niebla salina, se evaluó el comportamiento del producto terminado con las diferentes concentraciones utilizadas ante la exposición a condiciones aceleradas de corrosión.

3.4.4. Variable respuesta

Para cada uno de los experimentos realizados se obtuvo resultados, los cuales fueron evaluados por medio de mediciones con equipos de laboratorio u otros métodos de análisis.

Las variables respuesta para cada uno de los experimentos se detallan a continuación.

Tabla No. 7 Variables respuesta

Experimento	Nombre	Variable respuesta
Experimento No. 1	Evaluación de las etapas del proceso de pasivación de acero galvanizado.	Etapas del proceso y aquellas incidentes en la resistencia a la corrosión del producto terminado. Diagrama causa - efecto.
Experimento No. 2	Evaluación de calidad del producto terminado.	Deposición de pasivante en el producto terminado con las distintas concentraciones evaluadas.
Experimento No. 3	Ensayo de apilamiento húmedo.	Área afectada con óxido, de las muestras de producto terminado con las distintas concentraciones utilizadas, expuestas a condiciones de humedad.
Experimento No. 4	Ensayo de niebla salina.	Área afectada con óxido, de las muestras de producto terminado con las distintas concentraciones utilizadas, expuestas a condiciones de corrosión aceleradas.
Fuente: elaboración propia.		

3.4.5 Metodología de análisis

- Experimento No. 1 Evaluación del proceso de pasivación de acero galvanizado.

Se analiza el proceso de producción de pasivación de acero galvanizado, tomando en cuenta todos los aspectos relevantes, por medio de una herramienta de análisis de métodos: diagrama de causa y efecto.

- Experimento No. 2 Evaluación de calidad de producto terminado

Se realizaron las mediciones deposición de ácido pasivante en lámina galvanizada con las distintas concentraciones utilizadas. Estas mediciones se realizaron en triplicado para obtener mayor certeza y verificar la precisión de los resultados. Se obtuvo un valor promedio calculando la media aritmética por medio de la ecuación No. 9. El valor obtenido constituyó el resultado de la deposición de cada una de las soluciones utilizadas.

Se calculó el valor de la desviación de los resultados obtenidos por medio de la ecuación No. 1 con el fin de conocer la desviación de cada uno de los datos obtenidos respecto a la media.

El resultado obtenido de la deposición utilizada de las diferentes concentraciones de ácido pasivante, constituyó la base para la elaboración de las distintas curvas observadas en cada una de las gráficas del comportamiento del acero galvanizado analizado.

- Experimento No. 3 Ensayo de apilamiento húmedo

Se realizó la medición del área de acero galvanizado con protección pasiva, afectada por óxido. Esta medición se realizó en triplicado, por lo que se obtuvo un valor promedio calculando la media aritmética por medio de la ecuación No. 9. El valor obtenido constituye el resultado del área afectada con óxido para cada prueba de apilamiento.

Se calculó el valor de la desviación de los resultados obtenidos por medio de la ecuación No. 1 con el objetivo de conocer cuánto se desvía el resultado de cada prueba analizada respecto al valor medio.

El resultado del área afectada por el óxido constituyó la variable dependiente en la gráfica resultado del comportamiento del acero ante condiciones de humedad.

- Experimento No. 4 Ensayo de niebla salina

Se realizó la medición del área de acero galvanizado con protección pasiva, afectada por óxido. Esta medición se realizó en triplicado, por lo que se obtuvo un valor promedio calculando la media aritmética por medio de la ecuación No. 9. El valor obtenido constituyó el resultado del área afectada por el óxido.

Se calculó el valor de la desviación de los resultados obtenidos por medio de la ecuación No. 1 con el objetivo de conocer cuánto se desvía el resultado de cada muestra del valor de la media.

El resultado del área afectada por el óxido constituyó la variable dependiente en la gráfica resultado del comportamiento del acero ante la exposición a condiciones aceleradas de corrosión.

4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Evaluación del proceso de pasivación de acero galvanizado

Figura No. 59 Diagrama causa – efecto para el proceso de pasivación del acero galvanizado

Diagramadora: Silvia María Castillo Lanza

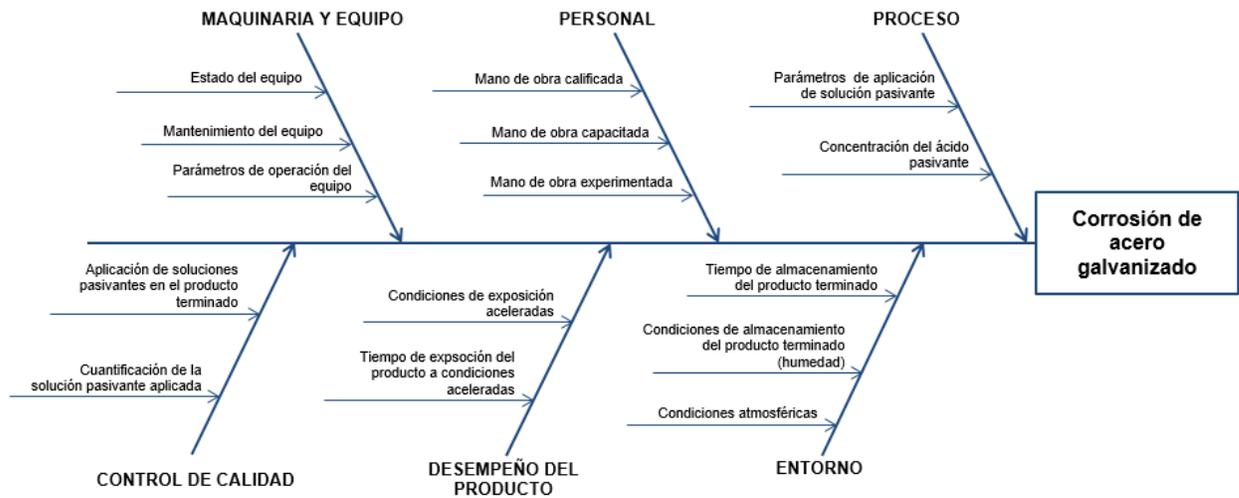


Tabla No. 8 Causas y evaluaciones del proceso de pasivación del acero galvanizado.

Aspecto evaluado	¿Afecta directamente la resistencia a la corrosión del producto final?		Acciones para evaluar la corrosión del producto terminado
	Sí	No	
Estado del equipo		x	Ninguna. El estado del equipo es adecuado para el proceso de pasivación de acero galvanizado.
Mantenimiento del equipo		x	Ninguna. El equipo recibe mantenimiento periódicamente.

Aspecto evaluado	¿Afecta directamente la resistencia a la corrosión del producto final?		Acciones para evaluar la corrosión del producto terminado
	Sí	No	
Parámetros de operación del equipo	x		Ninguna. Debido a la producción con la que se encuentra comprometida la línea de producción y las limitaciones de modificar los parámetros, estos no fueron sujeto de evaluación.
Mano de obra calificada		x	Ninguna. La mano de obra es evaluada previa a ser colocada en la función específica del proceso.
Mano de obra capacitada		x	Ninguna. La mano de obra recibe la capacitación adecuada previa a iniciar sus labores específicas en el proceso.
Mano de obra experimentada		x	Ninguna. La mano utilizada en el proceso de pasivación de acero galvanizado cuenta con trayectoria en la industria.
Parámetros de aplicación de solución pasivante	x		Se evaluó el pH, la concentración de cromo y zinc de las soluciones pasivantes a utilizar.
Concentración del ácido pasivante	x		Se evaluó tres distintas concentraciones de ácido pasivante para comprobar el efecto en la resistencia a la corrosión.
Aplicación de soluciones pasivantes en el producto terminado	x		Se evaluó la cantidad de ácido pasivante aplicada al producto terminado con cada una de las formulaciones utilizadas.
Cuantificación de la solución pasivante utilizada	x		

Aspecto evaluado	¿Afecta directamente la resistencia a la corrosión del producto final?		Acciones para evaluar la corrosión del producto terminado
	Sí	No	
Condiciones de exposición aceleradas	x		Se evaluó el comportamiento del producto terminado por medio de ensayo normado.
Tiempo de exposición del producto a condiciones aceleradas	x		
Tiempo de almacenamiento del producto terminado	x		Se evaluó el comportamiento del producto terminado ante los factores de almacenamiento, humedad y exposición a condiciones atmosféricas.
Condiciones de almacenamiento del producto terminado (humedad)	x		
Condiciones atmosféricas	x		

Fuente: elaboración propia.

4.2. Evaluación de calidad del producto terminado

Tabla No. 9 Clave de identificación de las muestras de acero galvanizado analizadas, según la deposición de pasivante en el producto terminado.

Muestra	Deposición (g/m ²)		
	Ácido pasivante A	Ácido pasivante B	Ácido pasivante C
A	0.679	1.188	0.019
B	0.849	1.358	0.020
C	1.019	1.528	0.021
D	1.188	1.698	0.022
E	1.358	1.867	0.023
F	5.093	2.037	0.029

Fuente: elaboración propia.

4.3. Ensayo de apilamiento húmedo

Tabla No. 10 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de apilamiento húmedo.

Tiempo (días)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	46.667	35.417	37.083	25.833	17.917	17.083
14	61.667	51.667	45.000	37.500	30.417	23.750
21	88.750	92.500	82.917	69.167	55.833	54.167
28	125.000	114.167	100.417	80.417	60.417	59.167

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 11 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de apilamiento húmedo.

Tiempo (días)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	13.333	12.500	6.917	32.917	36.667	7.083
14	82.917	77.083	35.417	41.250	43.750	27.917
21	106.667	85.417	85.000	78.750	85.833	52.083
28	136.250	119.167	113.750	87.500	100.000	62.917

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 12 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de apilamiento húmedo.

Tiempo (días)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	12.167	6.250	2.500	3.333	0.833	0.750
14	13.000	9.583	2.500	3.750	1.250	1.667
21	44.583	17.083	4.167	5.000	3.333	1.917
28	48.333	20.833	4.583	5.833	5.000	2.750

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 13 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de apilamiento húmedo.

Tiempo (días)	Superficie con óxido (cm ²)
	A
0	0.000
1	137.583
2	150.000
7	150.000
14	150.000
21	150.000
28	150.000

Fuente: elaboración propia.

Figura No. 60 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de apilamiento húmedo.

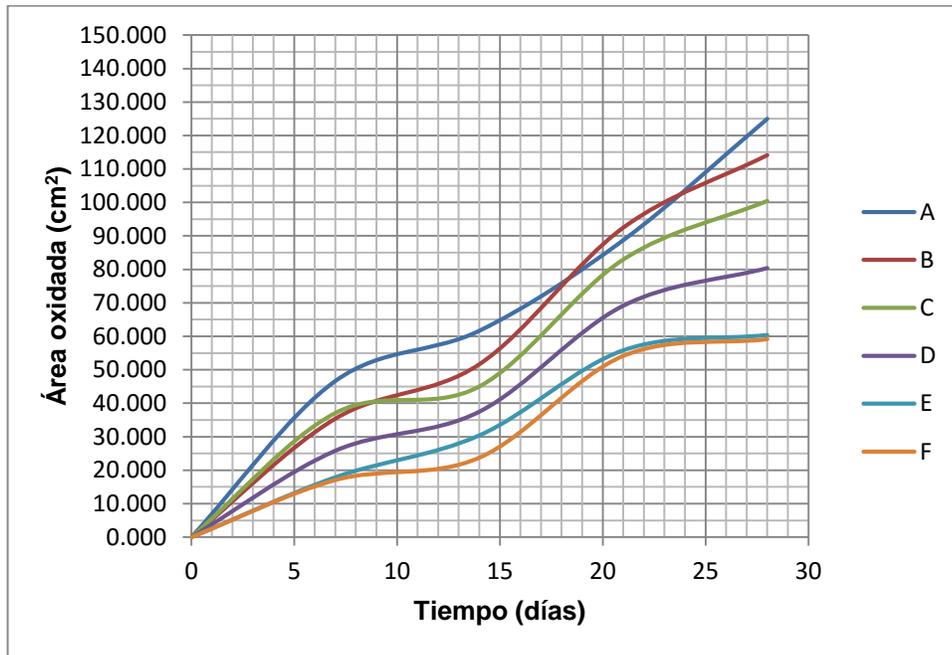


Figura No. 61 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de apilamiento húmedo.

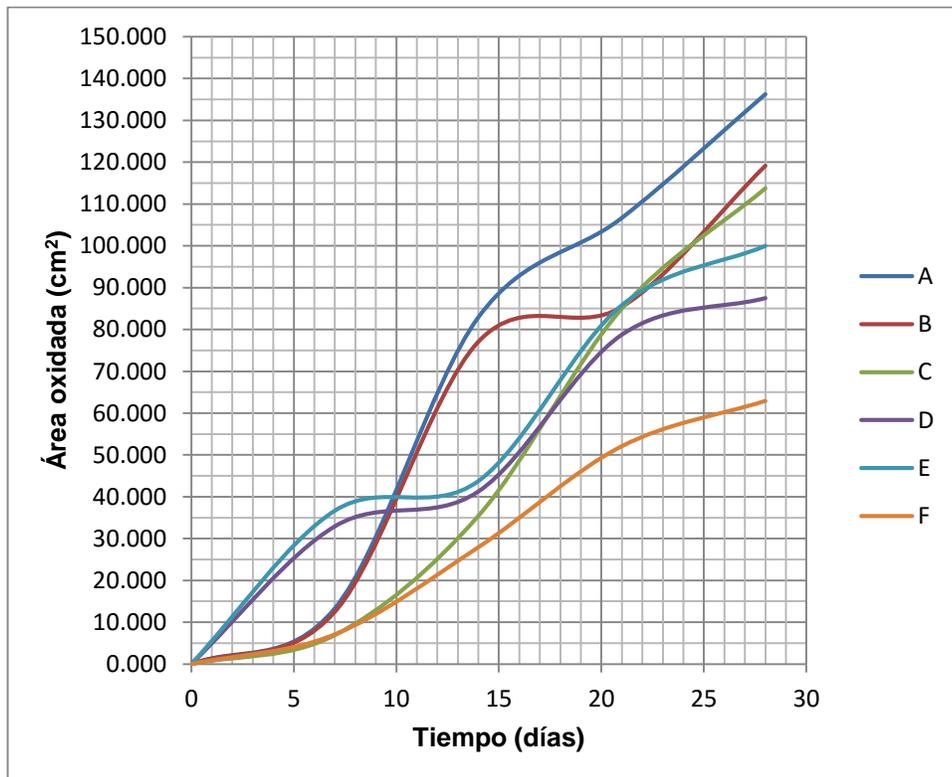


Figura No. 62 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de apilamiento húmedo.

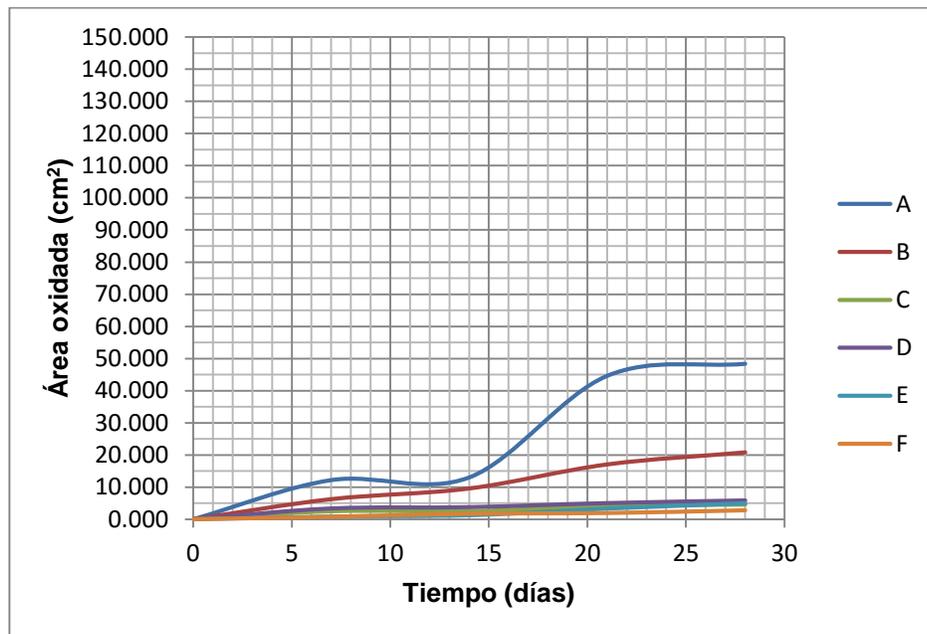
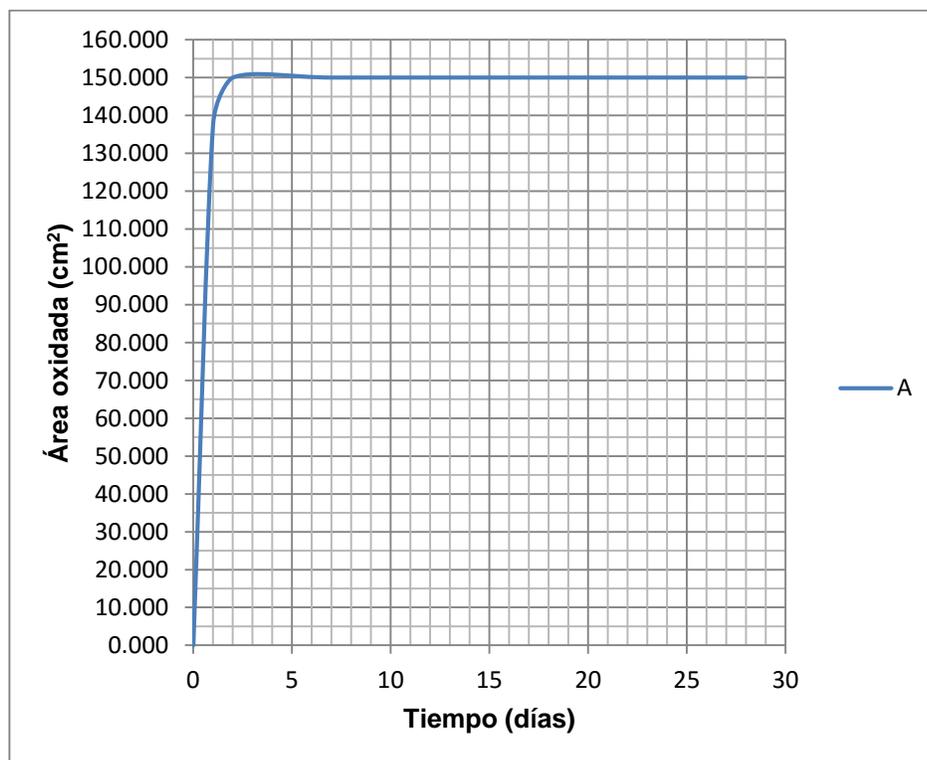


Figura No. 63 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de apilamiento húmedo.



4.4. Ensayo de niebla salina

Tabla No. 14 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de niebla salina.

Tiempo (horas)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	6.187	5.259	5.568	4.022	0.619	1.856
42	12.065	13.302	9.899	15.468	6.187	3.712
64	25.057	15.777	17.942	18.252	14.540	4.640
86	36.813	21.655	30.007	34.029	27.842	6.187
111	38.360	44.547	36.503	32.173	25.057	11.755
155	45.165	39.288	37.432	36.503	37.432	12.683
170	80.431	78.266	87.856	84.762	80.741	80.122

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 15 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de niebla salina.

Tiempo (horas)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
42	7.424	5.259	7.115	2.784	3.403	2.475
64	12.374	11.137	10.827	5.568	5.568	6.187
86	14.540	11.755	14.230	8.662	8.971	7.115
111	19.180	17.942	16.396	14.540	10.209	9.899
155	22.273	23.511	20.417	20.417	18.252	17.633
170	85.690	81.050	73.316	87.547	81.359	82.597

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 16 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de niebla salina.

Tiempo (horas)	Superficie con óxido (cm ²)					
	A	B	C	D	E	F
0	0	0	0	0	0	0
21	6.496	6.496	2.475	4.331	1.237	1.856
42	16.086	8.043	7.424	7.115	3.712	3.403
64	22.273	12.374	10.209	8.043	5.568	2.784
86	25.676	17.633	14.230	10.209	3.712	6.187
111	35.575	19.799	18.252	15.158	10.209	6.806
155	32.791	24.439	20.417	15.468	12.683	8.043
170	90.640	75.482	75.482	66.201	75.482	53.518

Fuente: elaboración propia.

Tabla No. 17 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de niebla salina

Tiempo (horas)	Superficie con óxido (cm ²)
	A
8	34.957
16	55.993
21	94.662
42	96.518
64	96.518
86	96.518
111	96.518
155	96.518
170	96.518

Fuente: elaboración propia.

Figura No. 64 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante A en ensayo de niebla salina.

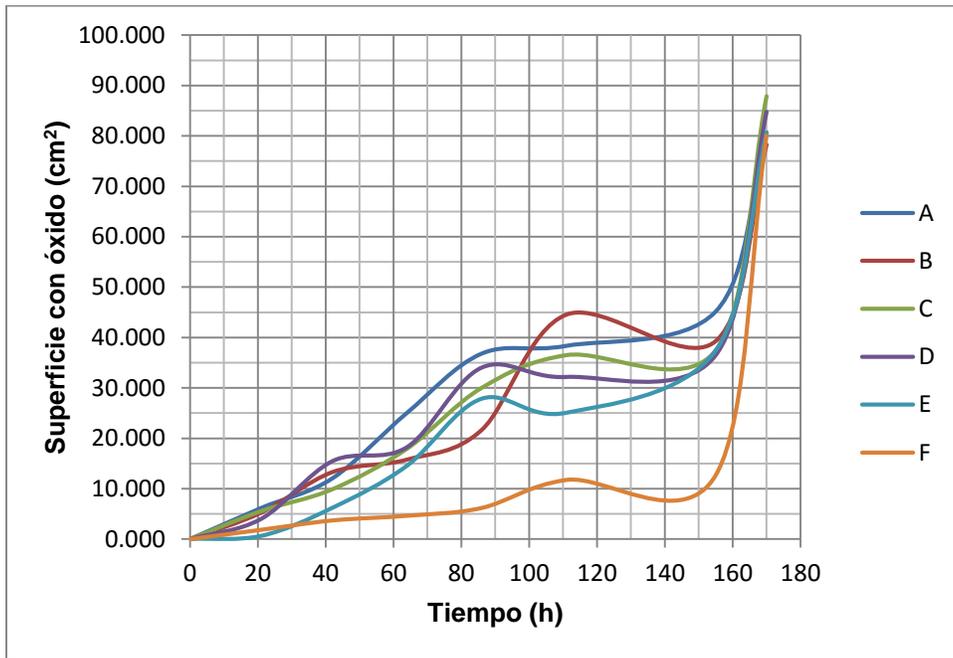


Figura No. 65 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante B en ensayo de niebla salina.

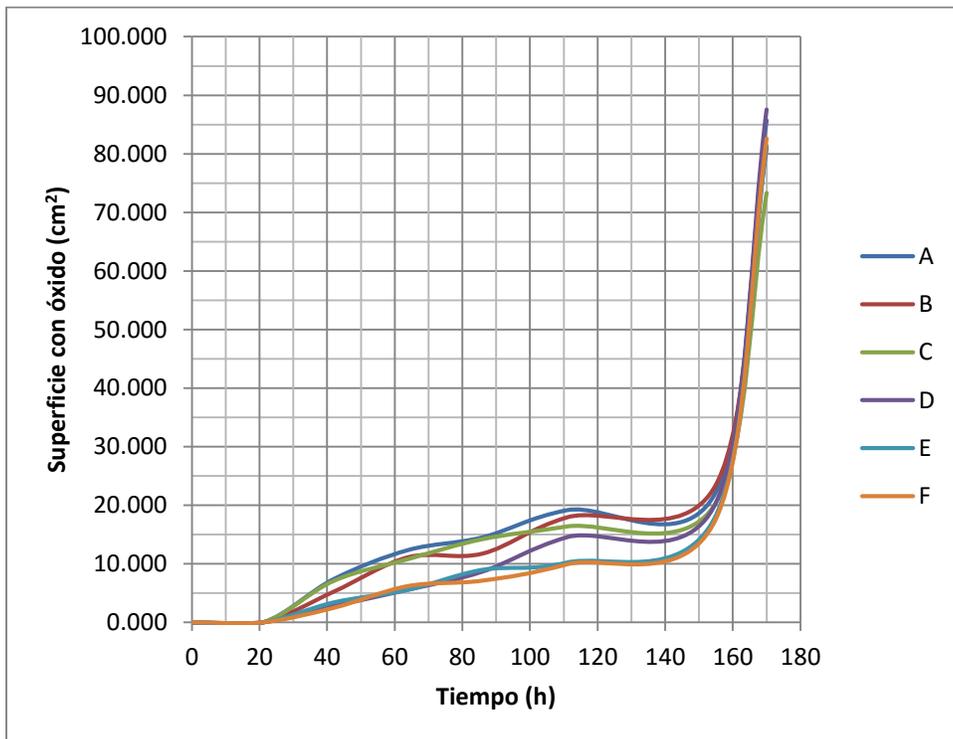


Figura No. 66 Comportamiento del producto terminado con ácido pasivante C en ensayo de niebla salina.

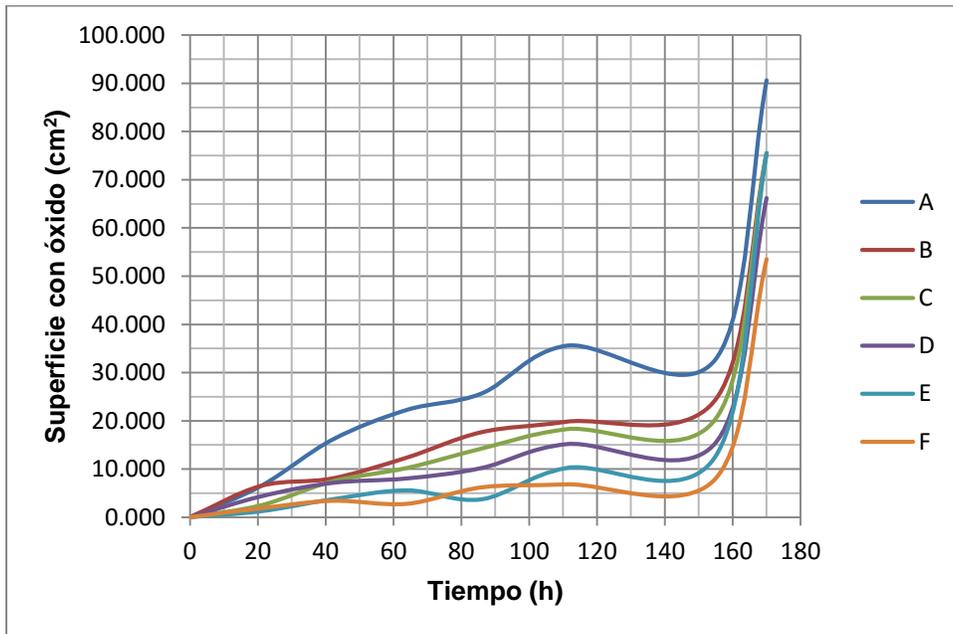


Figura No. 67 Comportamiento del producto terminado sin ácido pasivante en ensayo de niebla salina.

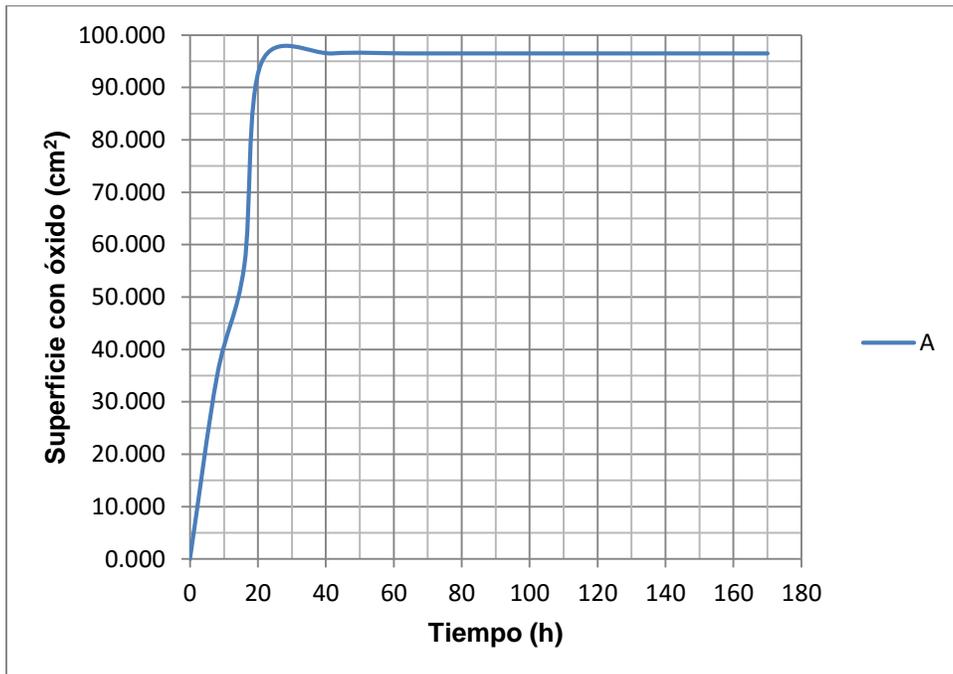
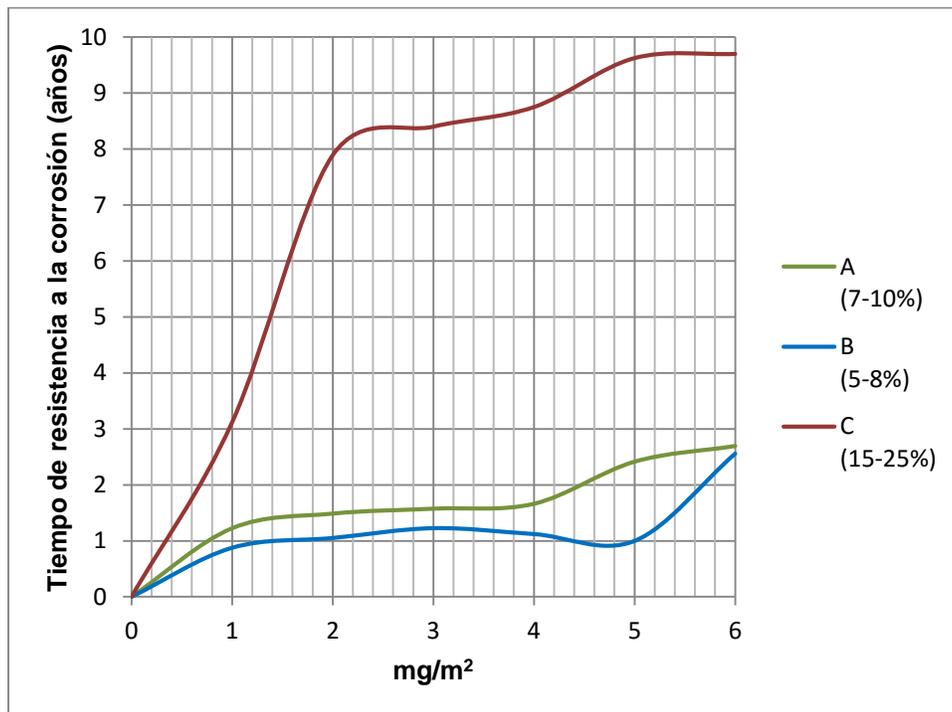


Figura No. 68 Tiempo esperado de resistencia a la corrosión de cada concentración de ácido utilizado en función de la cantidad aplicada al producto final.



5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio tenía como objetivo analizar un proceso de pasivación de acero galvanizado, como parte de un proceso productivo, por medio de distintas concentraciones de ácido pasivante para determinar la mejor opción en la protección del producto ante el ataque de la corrosión. Para ello se llevaron a cabo una serie de etapas las cuales se describen y discuten los resultados obtenidos a continuación.

Evaluación del proceso de pasivación de acero galvanizado

Para iniciar el estudio fue necesario conocer el proceso productivo de pasivación de acero galvanizado, observando la maquinaria y equipo utilizado, los insumos y materias primas, el personal que realiza el proceso, las condiciones y parámetros de operación y de aplicación de los ácidos pasivantes. Asimismo se determinó que una parte fundamental del proceso es aquella que se lleva a cabo posterior a la fabricación; el control de la calidad y evaluación del producto. Para esta última fase se estudiaron las prácticas necesarias realizadas en el laboratorio.

Una vez conocidas y enumeradas las fases del proceso de pasivación, se elaboró un diagrama de Ishikawa (Figura No. 59, página 76) en el cual se concretaron los factores que influyen en el resultado final del producto.

Luego de tener identificados los factores del proceso se realizó una tabla de análisis (Tabla No. 8, página 76) en la cual se detalla la incidencia de ellos. Se consideró una clasificación en aquellos que tienen incidencia directa sobre la resistencia a la corrosión del producto final y los que no; y sobre los que inciden directamente se describieron las acciones planteadas para analizar cada uno de ellos. Los factores definidos como incidentes fueron: parámetros de operación del equipo, parámetros químicos de aplicación del ácido pasivante, concentración del ácido pasivante y aplicación y cuantificación del ácido pasivante en el producto terminado. El tiempo y condiciones de exposición del producto a condiciones aceleradas y tiempo de exposición del producto a condiciones atmosféricas y de almacenamiento son factores que no definen la resistencia

del producto final, sin embargo fueron utilizados para evaluar el desempeño del producto ante el ataque de la corrosión.

La clasificación utilizada para los aspectos evaluados no discrimina ninguno de ellos como menos importante, sino que excluye aquellos que para fin del presente estudio no aportan un valor agregado y que a pesar que su modificación influye en el proceso, no es así directamente en la resistencia a la corrosión del acero galvanizado producido y pueden ser excluidos de la evaluación.

En el análisis realizado se encontró un aspecto que sí incide directamente en la resistencia a la corrosión pero no fue evaluado en el estudio; este es los parámetros de operación del equipo. El proceso de aplicación de solución pasivante al acero galvanizado se caracteriza porque se realiza de forma continua y automatizada. La uniformidad en la aplicación de la solución pasivante y deposición (la cantidad aplicada) depende de la velocidad a la que corre el acero galvanizado en la línea productiva, la presión de los rodillos aplicadores y la temperatura del horno de secado. Sin embargo, debido a la confidencialidad de la empresa y su proceso productivo así como el compromiso de esta con la producción, la información de estos parámetros no fue evaluada ni modificada en el estudio; por lo que se evaluó la variación de la deposición de pasivante dentro de los límites establecidos para la operación de forma normal.

Los aspectos; estado del equipo, mantenimiento del equipo, calificación, capacitación y experiencia de la mano de obra fueron clasificados como no incidentes directamente ya que estos influyen en el proceso pero no se pueden medir en función de las características del producto terminado. Asimismo las acciones con las que se controlan y evalúan dichos aspectos ya están considerados por la empresa en estudio y su realización corresponde a distintos departamentos de la organización.

Para los aspectos definidos anteriormente con incidencia directa se detallan en la tabla de análisis cada uno de los ensayos y prácticas a realizar para su análisis. Dichos ensayos se realizaron utilizando tres distintas concentraciones de ácido pasivante. Asimismo se realizaron las pruebas referentes a los aspectos de exposición a condiciones aceleradas, condiciones atmosféricas y almacenamiento con acero

galvanizado sin ninguna solución pasivante, para poder ejemplificar la acción de la corrosión con el zinc sin ninguna protección pasiva.

Evaluación de calidad del producto terminado

Para evaluar la aplicación de la solución pasivante en el producto terminado, se analizó la deposición. El término “deposición” hace referencia a la cantidad de ácido pasivante aplicado por unidad de área del producto terminado, expresándose con las unidades g/m^2 . La deposición es un parámetro muy importante de medir en el proceso de pasivación ya que influye en el tiempo de resistencia a la corrosión del producto terminado. La capa pasiva aplicada al acero galvanizado proporciona resistencia a la formación de óxido blanco, característico de la oxidación del zinc, volviendo inerte la superficie ante agentes oxidantes. Sin embargo la capa pasiva es consumida o destruida al transcurrir el tiempo, por lo que la cantidad aplicada tiene influencia en el comportamiento del producto ante la acción de la corrosión. Los ensayos de corrosión fueron realizados en función de la deposición del producto con cada una de las concentraciones de ácido pasivante utilizadas, con el fin de establecer la comparación y dependencia que tiene la deposición en la resistencia a la corrosión del producto final.

Para la realización de los ensayos se llevaron a cabo dos prácticas de laboratorio. La primera de ellas se encuentra en el Figura No. 52 (página 60) y consiste en la determinación de cromo en el acero galvanizado. La técnica utilizada es la espectrofotometría de absorción, por medio de la cual se obtienen los valores de cromo total presente en partes por millón, ppm (Tabla No. 20, página 115) y utilizando la ecuación de la Figura No. 53 se obtiene el resultado en g/m^2 (Tabla No. 33 página 129). En esta ecuación se utiliza un factor de 0.02546 el cual tiene unidades de L/m^2 y toma en cuenta la conversión de mg a g. La segunda práctica realizada se encuentra en el Figura No. 54 (página 62) la cual consiste en determinar la deposición de ácidos pasivantes con menor concentración por medio de pesos. Para la práctica se utilizó metil etil cetona (también llamado MEC) para remover el pasivante, este solvente permitió remover las partículas del pasivante que se encontraba diluido con un solvente con color por tratarse de una solución con compuestos orgánicos. De esta forma se obtuvo el peso neto de la solución pasivante, y conociendo el área de la muestra analizada se obtuvo el valor de la

deposición en g/m^2 (Tabla No. 31, página 128 y Tabla No. 32, página 128). La diferencia en los métodos utilizados para las soluciones pasivantes se debe a la naturaleza de cada una de ellas, la dilución realizada durante la preparación del proceso productivo con distintos solventes hace la diferencia en su análisis.

Al realizar los análisis de la aplicación de las soluciones pasivantes, se identificó la posibilidad de medir los parámetros de aplicación en la producción, como referencia y medida de control y aseguramiento que el proceso se lleva a cabo bajo condiciones estables y controladas. Los resultados de estas mediciones se encuentran en el anexo B. Estas mediciones se realizaron únicamente para el pasivante A, de mayor concentración, ya que esta práctica no se tienen establecida por la empresa en estudio para todos los rangos de soluciones utilizados.

Los resultados obtenidos para la evaluación de la calidad del producto a través del parámetro de deposición se encuentran en la Tabla No. 9 (página 78). Se puede observar la variación obtenida de deposición para cada una de las seis muestras analizadas (letras de la A a la F) y para cada solución utilizada (ácido pasivante A, B y C). Se obtuvo una variación en un rango de $0.679 - 5.093 \text{ g/m}^2$ para el ácido pasivante A, de $1.188 - 2.037 \text{ g/m}^2$ para el ácido pasivante B y de $0.019 - 0.029 \text{ g/m}^2$ para el ácido pasivante C. La variación en la deposición de cada muestra conforma la base para el análisis del comportamiento del producto terminado ante el ataque de la corrosión, pudiendo establecer su dependencia con dicha condición. Dicha variación obtenida se debe a la condiciones de operación del proceso de pasivación de la línea productiva. A pesar que los parámetros con los que se opera la maquinaria no fueron alterados (velocidad a la que corre el acero galvanizado, temperatura de secado) existen diversas condiciones que generan una variación en la deposición. Estos factores son la rugosidad de los rodillos aplicadores de la solución pasivante, la velocidad de rotación de los rodillos y la diferencia de la velocidad de los rodillos con la velocidad a la que corre el acero galvanizado. Dichos factores pueden ser modificados durante la producción de acero galvanizado de forma normal, dentro de parámetros permitidos ocasionando una variación en la cantidad de ácido pasivante que se aplica.

En la tabla de resultados mencionada para la deposición de pasivante en el producto terminado es posible observar una diferencia significativa entre la aplicación del ácido pasivante B y C respecto a la A. Esta diferencia se debe principalmente solvente utilizado para la preparación de dichas soluciones. Las figuras No. 33 (página 29) y No. 34 (página 29) muestran la forma en que un ácido pasivante que ha sido diluido con un pigmento y aquella que no, forma la capa de protección sobre el acero galvanizado respectivamente. El ácido pasivante que ha sido utilizado en solución acuosa forma una capa de protección de aproximadamente de 0.1µm mientras que el ácido pasivante que ha sido utilizado en solución con un pigmento forma una capa de aproximadamente 0.8 - 2 µm únicamente con la barrera física que proporciona el pigmento, adicional a una ligera capa de protección pasiva, expresando la necesidad de más solución aplicada por unidad. De esta forma la teoría del proceso permite la aplicación de solución pasivante en parámetros de 1.2 – 3 g/m² para los ácidos pasivantes A y B y de 0.015 – 0.020 g/m² para el ácido pasivante C, sin embargo estos rangos han sido ampliados por la empresa en estudio luego de estudiar su proceso productivo y obtener experiencia en la producción de acero galvanizado estableciendo un parámetro aproximado de 0.6 – 6 mg/m² para los ácidos pasivantes A y B, y 0.015 – 0.030 g/m² para el ácido pasivante C.

Ensayo de apilamiento húmedo

Obtenidas las muestras de acero galvanizado con cada una de las concentraciones de los ácidos pasivantes utilizados y analizada la deposición de cada una de ellas, se procedió a realizar el ensayo de apilamiento húmedo. Este ensayo tenía como objetivo evaluar el efecto del entorno sobre el producto final y como éste resiste ante el ataque de la corrosión debido al almacenamiento y exposición a condiciones atmosféricas.

El ensayo de apilamiento húmedo simula el almacenamiento del producto terminado por un tiempo prolongado. Se utilizaron 4 muestras para cada ensayo para poder crear un escenario de humedad atrapada el cual propicia la formación del óxido blanco (Figura No. 8, página 16).

Al preparar las muestras para el ensayo de apilamiento húmedo (Figura No. 56, página 64) se crea una celda de corrosión, en la que el área de acero galvanizado con mayor contacto al aire (altas concentraciones de oxígeno) es la parte catódica y el área

con menor contacto al aire (bajas concentraciones de oxígeno) y contacto con humedad es la parte anódica. El agua atrapada entre las superficies constituye el medio que permite la transmisión de los electrones (electrolito). En este ambiente la solución pasivante protege la superficie de zinc inhibiendo sus reacciones por lo que el metal se comporta como si tuviese un potencial electroquímico más noble (menos reactivo). Sin embargo la intensidad y la durabilidad de la capa pasiva dependen principalmente de la concentración de esta y del proceso de formación que tuvo con el acero galvanizado. El apareamiento de manchas color blanco, significa que la capa pasiva aplicada a las muestras de acero ha sido consumida, y la capa de zinc que recubre el acero negro ha comenzado a reaccionar con el oxígeno.

Para ejemplificar la acción del ácido pasivante se realizó la prueba de apilamiento húmedo con muestras de acero galvanizado de 150 cm² sin ningún ácido pasivante aplicado, obteniendo como resultado que éstas experimentaron la aparición de óxido blanco en el 100% de su superficie en el transcurso de un día (Tabla No. 13, página 80 y Figura No. 63, página 82). En este ensayo la humedad atrapada reaccionó directamente con el zinc del recubrimiento galvanizado sin tener ningún impedimento formando hidróxido de zinc el cual se puede observar en manchas blancas en la superficie de las muestras utilizadas.

Asimismo se realizó el ensayo de apilamiento húmedo con las distintas concentraciones de ácidos pasivantes en estudio. Para las tres soluciones analizadas se fijó un objetivo de tiempo de exposición de 28 días, tiempo durante el cual fueron periódicamente revisadas y evaluadas para medir el área sobre la cual había aparecido el óxido. Asimismo se utilizaron 6 diferentes deposiciones de cada ácido pasivante para determinar si estas tienen influencia en el efecto de resistencia a la corrosión y cuál de ellas proporciona un mejor desempeño.

Para el ácido pasivante A se observó que la aparición de óxido blanco en la superficie luego de 28 días se dio en 60 cm² para la deposición más baja y 125 cm² en la deposición más alta (Figura No. 60, página 81). Para el ácido pasivante B se observó que la aparición de óxido blanco en la superficie luego de 28 días se dio en 63 cm² en la deposición más baja y 135 cm² en la deposición más alta (Figura No. 61, página 81). Para el ácido

pasivante C se observó 5 cm² de óxido en la deposición más baja y 49 cm² en la deposición más alta luego de los 28 días (Figura No. 62, página 82). Se pudo determinar que los ácidos pasivante A y B presentan un comportamiento muy similar, sin embargo el ácido pasivante B proporcionó resultados más inestables que el ácido pasivante A, en los cuales al cabo de 15 días del ensayo, las muestras con deposiciones bajas habían alcanzado óxido en 90 cm². Por lo tanto, por medio del ensayo de apilamiento húmedo se determinó que el ácido pasivante que proporcionó mejor resistencia a la corrosión fue el C.

Ensayo de niebla salina

A las muestras obtenidas también se les practicó el ensayo de niebla salina (ASTM B117) con el objetivo de evaluar el desempeño del producto final y su resistencia a la corrosión en condiciones aceleradas. Para dicho ensayo se utilizó una cámara de niebla salina la cual permitió mantener condiciones controladas de operación, asimismo se utilizó una solución de cloruro de sodio al 5%. Este ensayo permite acelerar en el laboratorio el comportamiento que sufre un producto en un ambiente natural. Las muestras fueron introducidas en la cámara y posteriormente pulverizadas con la solución salina. En el tiempo en que las muestras permanecen dentro de la cámara están sujetas a una constante niebla salina por lo que son propensas a corrosión.

Para la evaluación de los resultados obtenidos se fijó una cantidad de horas (ligeramente superior a lo establecido en la norma ASTM B117; 170 horas vs 168 normadas) y se evaluó el área de las muestras que fue afectada por el óxido.

Con el fin de ejemplificar los beneficios del pasivante sobre el acero galvanizado se realizó el ensayo de niebla salina con muestras de 7.5 x 12.7 cm según lo establecido en la ASTM, sin ningún ácido pasivante aplicado. Los resultados obtenidos muestran que al haber transcurrido aproximadamente 20 horas de exposición el óxido había atacado el 100%; 96.518 cm² (Figura No. 67, página 86). En estas muestras el zinc presente en la capa de recubrimiento reaccionó con el agua salina presente en la niebla sin ningún factor que retardara dicha reacción de formación de óxido blanco. Seguidamente se realizó el ensayo de niebla a muestras de acero galvanizado de las mismas dimensiones con las tres concentraciones de ácidos pasivantes en estudio. El acero con el ácido pasivante A

mostró que al transcurrir las 170 horas, todas las deposiciones mostraban óxido en un rango de 78 – 88 cm² (Figura No. 64, página 85). El acero galvanizado con ácido pasivante B mostró que al transcurrir las 170 horas todas las muestras mostraban óxido en un rango de 74 – 88 cm² (Figura No. 65, página 85). El acero con ácido pasivante C mostró que al transcurrir las 170 horas todas las muestras mostraban óxido en un rango de 54 – 90 cm² (Figura No. 66, página 86). Como es posible observar, la evaluación final obtenida es bastante similar con las soluciones utilizadas, sin embargo es importante hacer notar que en las muestras con ácido pasivante A alcanzaron aproximadamente el 30% de superficie con óxido (28.955 cm²) alrededor de la hora 70, las muestras con ácido pasivante B alcanzaron el 30% alrededor de la hora 160 y las muestras con ácido pasivante C no lo alcanzan sino hasta la hora 165. Asimismo se establece una diferencia en el comportamiento durante todo el tiempo de la muestra ya que las muestras con ácido pasivante A se oxidan 30 cm² entre la hora 40 y la 140 mientras que las soluciones con ácido pasivante B tienen un inicio de oxidación más lento entre dichas horas (únicamente se oxida 10 cm²). En las muestras con ácido pasivante C inicia la oxidación en pocos puntos de tamaño muy pequeño desde la hora 20 y el comportamiento es bastante uniforme hasta llegar la hora 160 en donde se eleva el área oxidada.

En la prueba realizada se observa que el comportamiento observado en las muestras con ácido pasivante A y B tiene diferencias, sin embargo éstas se atribuyen a la diferencia que tienen las deposiciones utilizadas para ambos colores (Tabla 9, página 78). Algunas deposiciones analizadas del ácido pasivante A son inferiores a las utilizadas en el ácido pasivante B lo cual demuestra la influencia de estas en la resistencia a la corrosión del acero galvanizado, teniendo más impacto y notoriedad en el ensayo de cámara salina que en el ensayo de apilamiento húmedo debido a las condiciones aceleradas de exposición. Por lo tanto, por el ensayo realizado de niebla salina se determina que todas las soluciones presentan un buen desempeño en el recubrimiento de acero galvanizado y su resistencia a la corrosión, obteniendo un comportamiento más uniforme con el ácido pasivante C.

Con ambas pruebas se pudo determinar que con mayor concentración y deposición de ácido pasivante mayor es la resistencia a la corrosión que presenta el acero

galvanizado debido a que aumenta el tiempo de protección ante los factores corrosivos a los que es expuesto en condiciones tanto naturales como aceleradas.

Luego de realizar los ensayos de laboratorio a las muestras de acero galvanizado con cada una de las concentraciones aplicadas de ácido pasivante y obtener los respectivos resultados se elaboró la Figura No. 68 (página 87), con el fin de mostrar gráficamente el tiempo aproximado esperado de resistencia de cada concentración de ácido pasivante, según la cantidad que sea aplicada al producto de acero galvanizado. Con esta gráfica es posible para cualquier usuario o consumidor de productos de acero galvanizado, conocer qué tiempo puede esperar que su producto resista a la acción de la corrosión, según la concentración y deposición que adquiera en sus productos. Es necesario considerar que esta gráfica se elaboró partiendo de los resultados experimentales obtenidos y el comportamiento observado de cada ácido pasivante utilizado en el presente estudio, por lo cual se debe tomar en cuenta las condiciones definidas en el Anexo A bajo las cuales se evaluaron los resultados.

6. CONCLUSIONES

Se confirmó la efectividad del proceso de pasivación de acero galvanizado por medio de la utilización de tres rangos diferentes de concentración de ácido pasivante, determinando la resistencia a la corrosión del producto terminado, así como la solución con el mejor desempeño.

6.1 El proceso de pasivación de acero galvanizado es directamente proporcional a la concentración de ácido pasivante utilizado. El almacenamiento del producto final y las condiciones de exposición aceleradas permiten evaluar la resistencia a la corrosión del producto terminado.

6.2 Se obtuvo una deposición en un rango de $0.679 - 5.093 \text{ g/m}^2$ para el acero galvanizado con ácido pasivante A, $1.188 - 2.037 \text{ g/m}^2$ para el acero galvanizado con ácido pasivante B y $0.019 - 0.029 \text{ g/m}^2$ para el acero galvanizado con ácido pasivante C.

6.3 Se obtuvo luego de 28 días de exposición al ensayo de apilamiento húmedo, un área de óxido en un rango aproximado de $60 - 125 \text{ cm}^2$ para el acero con el ácido pasivante A, $63 - 135 \text{ cm}^2$ en el acero con el ácido pasivante B y $5 - 49 \text{ cm}^2$ en el acero con el ácido pasivante C, demostrando que el ácido pasivante C fue el que mostró el mejor desempeño.

6.4 Se obtuvo luego de 70 horas de exposición al ensayo de niebla salina, un área de óxido en un rango aproximado de $78 - 88 \text{ cm}^2$ en el acero con el ácido pasivante A, $74 - 88 \text{ cm}^2$ en el acero con el ácido pasivante B y $54 - 90 \text{ cm}^2$ en el acero con el ácido pasivante C, demostrando que ante exposición a condiciones aceleradas de corrosión, las tres concentraciones de ácido pasivante presentan un comportamiento similar. Sin embargo el comportamiento durante todo el ensayo se presenta de forma más estable con el ácido pasivante C, y los ácidos pasivante A y B se ven diferenciadas en función de la deposición del producto final.

7. RECOMENDACIONES

7.1 Realizar un estudio económico sobre la posibilidad de utilización de cada uno de los rangos de concentración de ácido pasivante evaluado, tomando en cuenta todos los factores del proceso productivo, con el fin de conocer la relación costo/beneficio con los resultados obtenidos en el presente estudio.

7.2 Implementar prácticas analíticas de control del proceso de aplicación de las diferentes concentraciones de ácido pasivante.

7.3 Realizar estudios de correlación de la concentración de ácido pasivante con el tiempo de durabilidad de la lámina galvanizada utilizando técnicas electroquímicas de control.

8. REFERENCIAS

- ALACERO Arquitectura en Acero. (S/F) *Proceso siderúrgico*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:00 horas en <http://arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/materiales/proceso-siderurgico>
- American Galvanizers Association. (2017) *Chemical Reaction between Chromates and Galvanized Steel*. Consultado en Internet el 29/01/2017, 11:00 horas en: <http://www.galvanizeit.org/education-and-resources/resources/technical-faq-dr-galv/chemical-reaction-between-chromates-and-galvanized-steel>
- American Galvanizers Association. (2017) *Passivation*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:00 horas en <http://www.galvanizeit.org/specification-and-inspection/post-hdg-considerations/passivation>
- American Galvanizers Association. (2017) *Mancha de oxidación por almacenamiento*. Consultado en Internet el 26 de marzo de 2017, 17:00 horas en: https://www.galvanizeit.org/uploads/publications/Wet_Storage_Stain_Spanish.pdf
- American Society for Testing and Materials, ASTM (2009). *Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process*. Consultado en Internet el 12/03/2017, 22:00 horas en http://www.unitedmetalproducts.info/sites/default/files/downloads/ASTM_A_653_REDLINE.pdf
- American Society of Testing and Materials. (2006) *Cómo protegen los revestimientos metálicos al acero*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 14:00 horas en <https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q206/q206aprdallynside.html>
- Asociación Técnica Española de Galvanización (ATEG). (2017) *Prevención y eliminación de manchas blancas por almacenamiento en húmedo de productos galvanizados*. Consultado en internet el 28/03/2017, 22:00 horas en <https://galvanizacion.com/2011/11/04/prevencion-y-eliminacion-de-manchas-blancas-por-almacenamiento-en-humedo-de-productos-galvanizados/>

Asrar, N.; MacKay, B.; Birketveit, O.; Stipanicev, M.; Jackson, J.; Jenkins, A.; Melot, D.; Scheie, J.; Vittonato, J. (2016) *La corrosión: La lucha más extensa*. Consultado en internet el 18/03/2017, 23:00 horas en http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/spanish16/may16/03-corrosion.pdf

AUJOR Especialistas en tratamientos del acero inoxidable. (S/F) *Limpieza, decapado y pasivado del acero inoxidable en aplicaciones industriales*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:00 horas en <http://www.aias.es/JornadasTecnicas-ponencias-pdf/2015-Ponencias%20Jornada1%2027-5-15%20Subcontratacion/limpieza%20decapado%20y%20pasivado%20del%20acero%20inoxidable%20en%20aplicaciones%20industriales.2.pdf>

Barrita, V. (2007) *Evaluación de diversas formulaciones de convertidores de óxido aplicados en probetas de acero 1010 expuestas en ambiente ácido*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México. México.

Biblioteca Digital ILCE. (S/F) *Efectos del medio ambiente en la conservación de bienes y equipos metálicos*. Consultado en Internet el 12/02/2017, 21:00 horas en http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_5.htm

Biblioteca Digital ILCE. (S/F) *¿Se puede medir la corrosión?* Consultado en Internet el 06/02/2017, 23:00 horas en http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_9.html

Broseta, M. (S/F) *Corrosión de hierro*. Consultado en Internet el 28/03/2017, 18:30 horas en https://iespmbroseta.edu.gva.es/04h_fisica/carpeta_arxiu/Corrosion%20Fe.pdf

Brown, T., LeMay, H., Bursten, B., Burdge, J. (2004) *Química La Ciencia Central* (9ª ed.) México; Editorial Pearson.

Ciencia y Técnica Administrativa (C&TA). (S/F) *Diagrama de causa y efecto*. Consultado en Internet el 01/04/2017, 15:00 horas en http://www.cyta.com.ar/biblioteca/bddoc/bdlibros/herramientas_calidad/causaefecto.htm

Construmática. (S/F) *El Zinc como Metal Protector*. Consultado en Internet el 13/03/2017, 22:00 horas en http://www.construmatica.com/construpedia/El_Zinc_como_Metal_Protector

Creative Research Systems. (2016) *The Survey System*. Consultado en internet el 08/07/2017, 20:00 horas en <https://www.surveysystem.com/sample-size-formula.htm>

Educar. (2011) *Titulaciones ácido – base*. Consultado en internet el 30/03/2017, 23:00 horas en <https://www.educ.ar/recursos/15081/titulaciones-acido-base>

E-ducativa. (S/F) *Corrosión*. Consultado en Internet el 28/03/2017, 22:00 horas en http://e-ducativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/4750/4912/html/22_electroquimica_o_galvnica.html

Estrucplan. (S/F) *Tratamientos*. Consultado en Internet el 13/05/2017, 18:00 horas en <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=3086>

GalvInfoNote 2.1. (S/F) *El proceso continuo de recubrimiento por inmersión en caliente para productos de planchas de acero*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 15:00 horas en http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote2_1.pdf

GalvInfoNote 2.10. (S/F) *Impartiendo resistencia a las manchas durante el almacenamiento*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:30 horas en http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote2_10.pdf

GalvInfoNote 3.2. (S/F) *Protección de productos de planchas de acero galvanizado de las manchas durante el almacenamiento*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:30 horas en http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote3_2.pdf

GalvInfoNote 3.4. (S/F) *Ensayo de Niebla Salina*. Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:00 horas en http://latiza.com/archivos_publicar/galvinfo/GalvInfoNote3_4.pdf

Gestión de Calidad Total. (S/F) *Muestreo Indexado según AQL: MIL-STD-105E*. Consultado en Internet el 04/03/2017, 20:00 horas en www.gestiondecalidadtotal.com/mil_std_105e.html

- Grasso, L.; Segre, A.; Ienco, M.; Parodi, A.; Pinasco, M.; Engelini, E.; Rosalbino, F. (2006) *Corrosion Resistance of Cr (III) Based Conversion Layer on Zinc Coatings in Comparison with a Traditional Cr (VI) Based Passivation Treatment*. Consultado en Internet el 25/02/2017, 20:00 horas en file:///C:/Users/scasti/Downloads/649-2501-1-PB.pdf
- Hernandez Garza, M. (2009) *Gráficos de control de datos individuales y rangos móviles (X – Rm)*. Consultado en Internet el 01/04/2017, 14:00 horas en <https://optyestadistica.wordpress.com/2009/04/26/ejemplo-graficos-de-control-de-datos-individuales-y-rangos-moviles-x-rm/comment-page-1/>
- Hernandez, M. (2008) *Tabla de constantes para gráficos de control*. Consultado en Internet el 18/05/2017, 20:00 horas en <https://optyestadistica.wordpress.com/2008/08/27/tabla-de-constantes-para-graficos-de-control/>
- Hernandez Sampieri, Roberto. Fernández Collardo, Carlos. Baptista Lucio, Pilar. (2010). *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill. Quinta Edición. México.
- Hypred. *Pasivación de los aceros inoxidable*. (S/F) Consultado en Internet el 04/02/2017, 15:00 horas en <http://agronetbrewing.com/pdf/pasivacion.pdf>
- IMINOX. *Pasivado, un proceso controlado para restaurar la resistencia a la corrosión*. (2015) Consultado en Internet el 05/02/2017, 21:00 horas en <http://www.blog.iminox.org.mx/?q=node/335>
- InfoAcero. *¿Qué es el acero?* (2000) Consultado en Internet el 10/03/2017, 23:00 horas http://www.infoacero.cl/acero/que_es.htm
- InfoAcero. *Corrosión*. (2000) Consultado en Internet el 04/02/2017, 16:00 horas en <http://www.infoacero.cl/acero/corrosion.htm>
- Instituto Latinoamericano de la comunicación Educativa, ILCE. *La corrosión en la vida diaria*. (S/F) Consultado en Internet el 19/03/2017, 22:00 horas en http://www.bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_6.html

Instituto de Salud Pública de Chile. *Validación de métodos y determinación de la incertidumbre de la medición: Aspectos generales sobre la validación de métodos.* (2010) Consultado en Internet el 24/02/2017, 22:00 horas en http://www.ispch.cl/sites/default/files/documento_tecnico/2010/12/Guia%20T%C3%A9cnica%201%20validaci%C3%B3n%20de%20M%C3%A9todos%20y%20determinaci%C3%B3n%20de%20la%20incertidumbre%20de%20la%20medici%C3%B3n_1.pdf

Instituto de Desarrollo Urbano. (S/F) *Guía práctica de galvanizado por inmersión en caliente.* Consultado en Internet el 12/03/2017, 22:00 horas en http://www.andi.com.co/cf/PublishingImages/Paginas/Documentos_de_interes/Guia%20de%20Galvanizado%20Inmersi%C3%B3n%20en%20Caliente.pdf

La Metalurgia Italiana. *Corrosion Resistance of Cr (III) Based Conversion Layer on Zinc Coatings in Comparison with a Traditional Cr (VI) Based Passivation Treatment.* (S/F) Consultado en Internet el 30/01/2017, 22:00 horas en <file:///C:/Users/Silvia/Downloads/649-2501-1-PB.pdf>

Méndez Pérez, A. (2016). *Protección Catódica: Ánodos de sacrificio.* Proyecto de Fin de Grado en Náutica y Transporte Marítimo. Universidad de La Laguna. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería.

Molina, N., Aguilar, P., Cordovez, C. (2010). *Plomo, cromo III y cromo VI y sus efectos sobre la salud humana.* Consultado en Internet el 25 de febrero de 2017, 22:00 horas en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5599145.pdf>

Moreno Fernández, Esther. (2008) *Corrosión de Armaduras en Estructuras de Hormigón: Estudio Experimental de la Variación de la Ductilidad en Armaduras Corroídas Aplicando el Criterio de Acero Equivalente.* Tesis de Doctorado. Universidad Carlos III de Madrid. Consultado en Internet el 13/02/2017, 23:00 horas en <http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/5095/Tesis%20Doctoral%20Esther%20Moreno.pdf?sequence=1>

Mortimer, C. (1983) *Química.* Grupo Editorial Iberoamérica. Versión en español de la obra Chemistry, 5th edition por Charles E. Mortimer. México.

Nervion Pinturas. (2017) *Oxidación*. Consultado en Internet el 25 de marzo de 2017, 13:00 horas en <https://www.nervion.com.mx/web/conocimientos/oxidacion.php>

Petrucci, R. et al. (2011) *Química General*. Editorial Pearson. Décima Edición. España.

ProCoat (2012) *New Challenges and Performances for Galvanized Steel*. Consultado el 8 de junio, 18:00 horas en <https://www.metalbulletin.com/events/download.ashx/document/speaker/6552/a0ID00000X0jXjMAJ/Presentation>

Pro-face. *Standards and Regulations*. (S/F) Consultado en Internet el 25/02/2017, 22:30 horas en <https://www.proface.es/worldwide/safety/rohs.html>

Products Finishing. *Replacing Hexavalent Chromium in Passivations on Zinc Plated Parts*. (2001) Consultado en Internet el 29/01/2017, 22:00 horas en <http://www.pfonline.com/articles/replacing-hexavalent-chromium-in-passivations-on-zinc-plated-parts>

Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española*. (2017) Consultado en Internet el 28/02/2017, 22:00 horas en <http://www.rae.es>

Santiago, S. (2007) *Contribución a la determinación de la fracción de metales traza ligados a las proteínas similares a las metalotioneínas en muestras de mejillón*. Memoria. Universidad de Santiago de Compostela, USC. España.

Scientific Research. *Anti-Corrosion Performance of Cr⁺⁶- Free Passivating Layers Applied on Electrogalvanized*. (2010) Consultado en Internet el 29/01/2017, 12:00 horas en http://file.scirp.org/pdf/MSA20100400004_30875148.pdf

Textos Científicos. *Tipos de Corrosión*. (2005) Consultado en Internet el 28/03/2017, 23:00 horas en <https://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. *Distribución Normal*. (S/F) Consultado en internet el 08/07/2017, 20:00 horas en <http://www.uaaan.mx/~jmelbos/tablas/tabest.pdf>

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. *Muestra y Muestreo*. (2012) Consultado en internet el 08/07/2017, 20:00 horas en

https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/tizayuca/gestion_tecnologica/muestraMuestreo.pdf

Universidad de Castilla La Mancha, UCLM. *Evaluación*. (S/F) Consultado en Internet el 10/03/2017, 22:00 horas en <http://www.uclm.es/profesorado/ricardo/practicum/relieve/evaluacion.htm>

Universidad de Costa Rica Escuela de Administración y Negocios. *Tablas Militares*. (S/F) Consultado en Internet el 08/03/2017, 22:00 horas en <http://www.ucreanop.org/descargas/Ejercicios/Gerencia%20de%20Operaciones/Tablas%20Militares.pdf>

Universidad de la Habana, Facultad de Química. *Efectos tóxicos de los compuestos de cromo*. (S/F) Consultado en Internet el 09/02/2017, 22:00 horas en http://www.fq.uh.cu/dpto/qi/ino2/Grupo_6/toxicidad_cromo.htm

Universidad Politécnica de Valencia, UPV. *Fenómenos de pasivación del metal*. (S/F) Consultado en Internet el 07/03/2017, 20:00 horas en https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_3_2.html

Universidad Tecnológica de Pereira, UTP. *Metalografía*. (S/F) Consultado en Internet el 11/03/2017, 16:00 horas en <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/#2149>

Universidad Tecnológica Nacional, UTN. (2017) *Protección de materiales*. Consultado en Internet el 04/03/2017, 20:00 horas en <http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/protecmat/proteccionanodica.pdf>

Vasquez, Lucía. *Por qué se oxidan los metales al aire libre*. (2017) Consultado en Internet el 04/02/2017, 15:00 horas en <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4770/por-que-se-oxidan-los-metales-al-aire-libre>

9. GLOSARIO Y ABREVIATURAS

9.1. Glosario

Absorción	pérdida de la intensidad de una radiación al atravesar un medio. (RAE, 2017)
Acero	aleación de hierro y carbono, en la que este entra en una proporción entre el 0.02 y el 2%, y que, según su tratamiento, adquiere especial elasticidad, dureza o resistencia. (RAE, 2017)
Ácido	dicho de una solución, que tiene un pH inferior a 7. (RAE, 2017)
Agente oxidante	la sustancia que se reduce y por tanto hace que se oxide alguna otra sustancia en una reacción de oxidación – reducción. (Brown, 2004)
Agente reductor	sustancia que se oxida y por tanto hace que se reduzca alguna otra sustancia en una reacción de oxidación – reducción. (Brown, 2004)
Aleación	producto homogéneo, obtenido por fusión, compuesto de dos o más elementos químicos, uno de los cuales, al menos, debe ser un metal. (RAE, 2017)
Amorfo	sin forma regular o bien determinada. (RAE, 2017)
Anión	ion con carga negativa. (RAE, 2017)
Apilar	poner una cosa sobre otra haciendo pila. (RAE, 2017)
Barrera	obstáculo, entre una cosa y otra. (RAE, 2017)
Base	sustancia que en disolución aumenta la concentración de iones hidroxilo y se combina con los ácidos para formar sales. (RAE, 2017)

Cationes	ion con carga positiva. (RAE, 2017)
Condensación	conversión de un valor en un líquido o en sólido. (RAE, 2017)
Corrosión	desgaste paulatino de los cuerpos metálicos por acción de agentes externos, persista o no su forma. (RAE, 2017)
Deposición	cantidad de una solución depositada sobre una superficie. (Brown, 2004)
Electrolito	sustancia que se somete a la electrólisis. (RAE, 2017)
Electrón	partícula elemental con carga eléctrica negativa, que gira alrededor del núcleo del átomo. (RAE, 2017)
Electronegatividad	una medida de la capacidad de un átomo que está unido a otro, para atraer electrones hacia sí. (Brown, 2004)
Electroquímico	parte de la fisicoquímica que trata de las leyes referentes a la producción de la electricidad por combinaciones químicas, y de su influencia en la composición de los cuerpos. (RAE, 2017)
Espectro de absorción	la cantidad de luz absorbida por una muestra, en función de la longitud de onda. (Brown, 2004)
Espontáneo	que tiene lugar si un aporte adicional de energía de fuera del sistema. (Brown, 2004)
Galvanización	baño de cinc fundido sobre una superficie metálica, para que no se oxide. (RAE, 2017)
Humedad	agua de que está impregnado un cuerpo o que, vaporizada, se mezcla con el aire. (RAE, 2017)
Herrumbre	óxido del hierro. (RAE, 2017)
Iones	átomo o agrupación de átomos que por pérdida o ganancia de uno o más electrones adquiere carga eléctrica. (RAE, 2017)
Metal	cada uno de los elementos químicos buenos conductores del calor y de la electricidad, con un brillo característico, sólidos a

	temperatura ordinaria, con excepción del mercurio. (RAE, 2017)
Niebla	nube muy baja, que dificulta la visión según la concentración de las gotas que la forman. (RAE, 2017)
Oxidación	acción y efecto de oxidar u oxidarse. (RAE, 2017)
Pasivar	tratar la superficie de un metal para formar una capa protectora contra la corrosión. (RAE, 2017)
Pátina	capa de óxido de color verdoso que, por la acción de la humedad, se forma en los objetos de metal. (Brown, 2004)
Pulverizar	esparcir un líquido en partículas muy tenues, a manera de polvo. (RAE, 2017)
Reducción	proceso en el que una sustancia adquiere uno o más electrones. (Brown, 2004)

9.2. Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
LC	límite de control central
LCI	límite de control inferior
LCS	límite de control superior
pH	potencial de hidrógeno
Redox	reacción óxido – reducción
Rm	rango móvil
S	desviación estándar
X	media aritmética

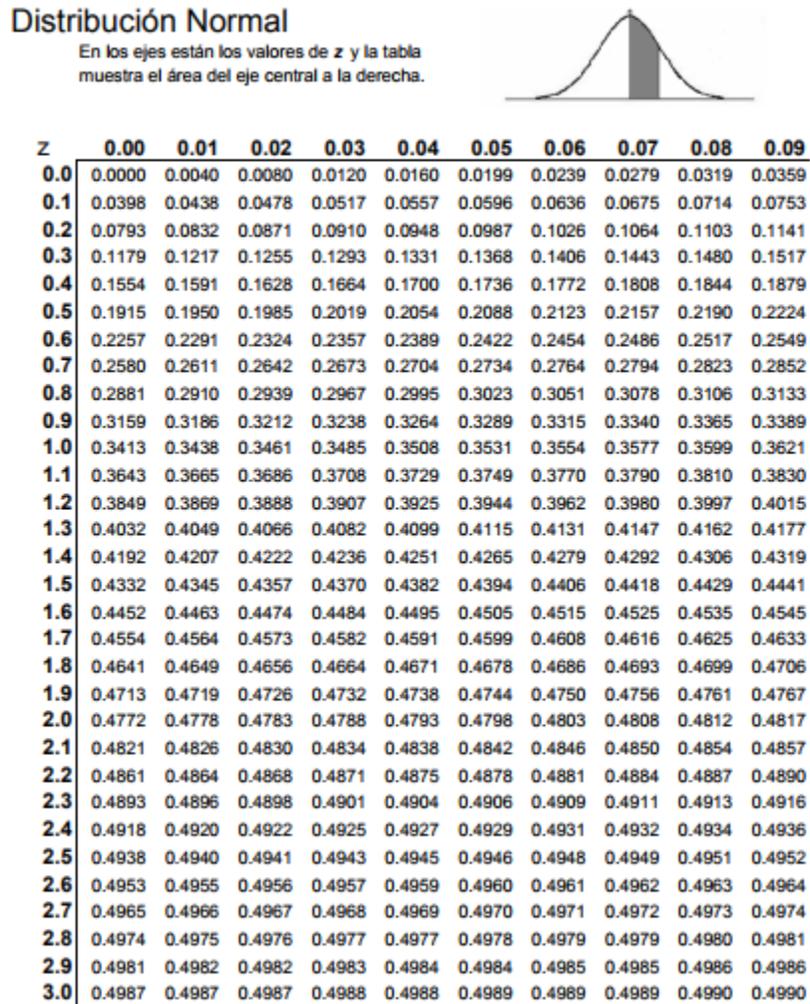
10. ANEXOS

10.1. ANEXO A: Condiciones de operación del presente estudio

- Temperatura ambiente mínima: 13°C
- Temperatura ambiente máxima: 28°C
- Humedad: 83 – 86%

10.2. ANEXO B: Tablas Mil Std 105E

Figura No. 69 Tabla de valores para la distribución normal



Fuente: (UAAAN, 2017)

10.3. ANEXO C: Evaluación de parámetros del proceso de pasivación

Figura No. 70 Media del pH de la solución pasivante aplicada

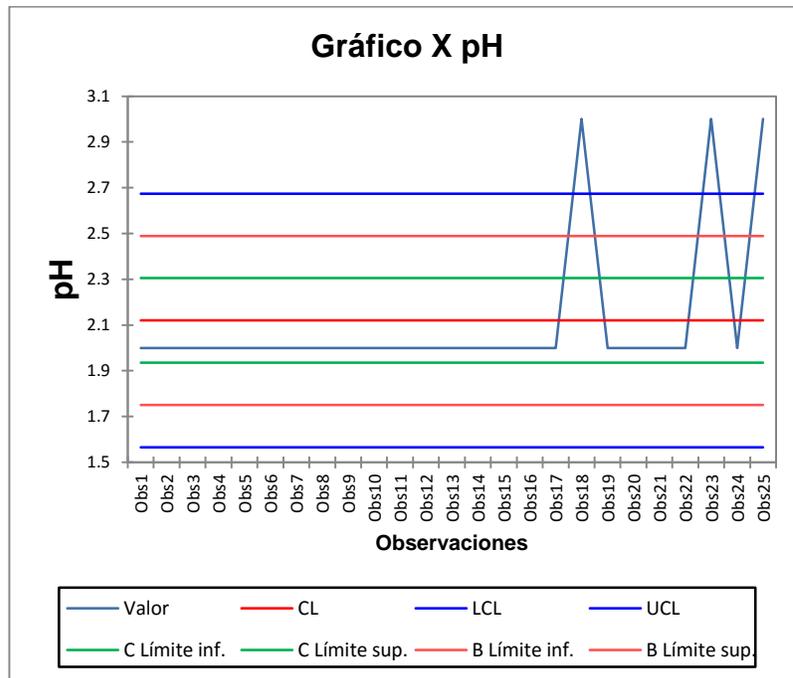


Figura No. 71 Rango del pH de la solución pasivante aplicada.

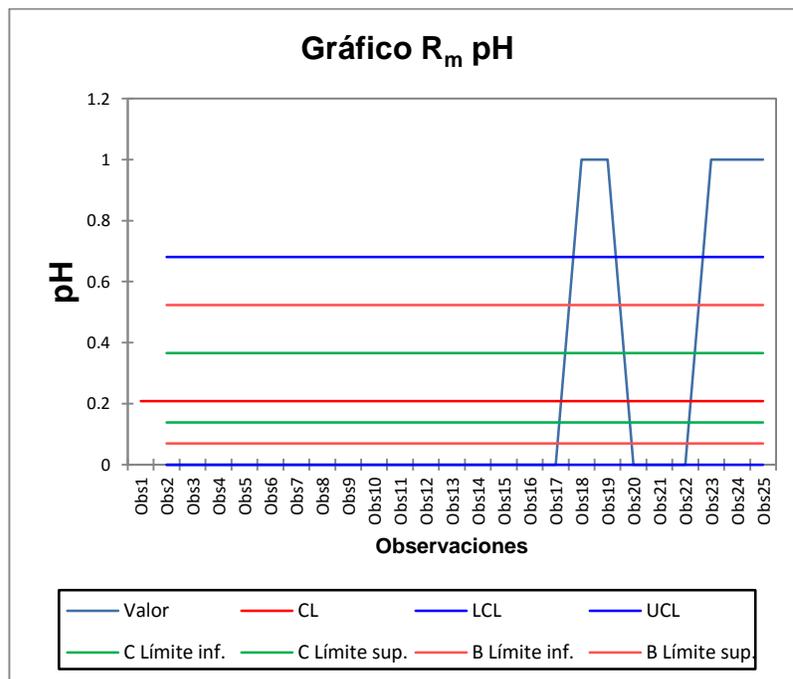


Figura No. 72 Media de la concentración de la solución pasivante aplicada.

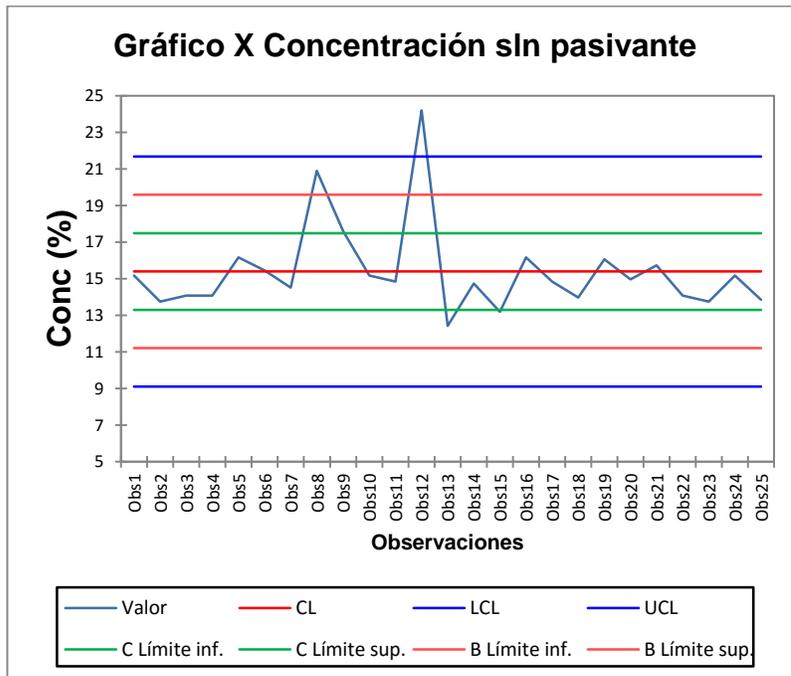


Figura No. 73 Rango de la concentración de la solución pasivante.

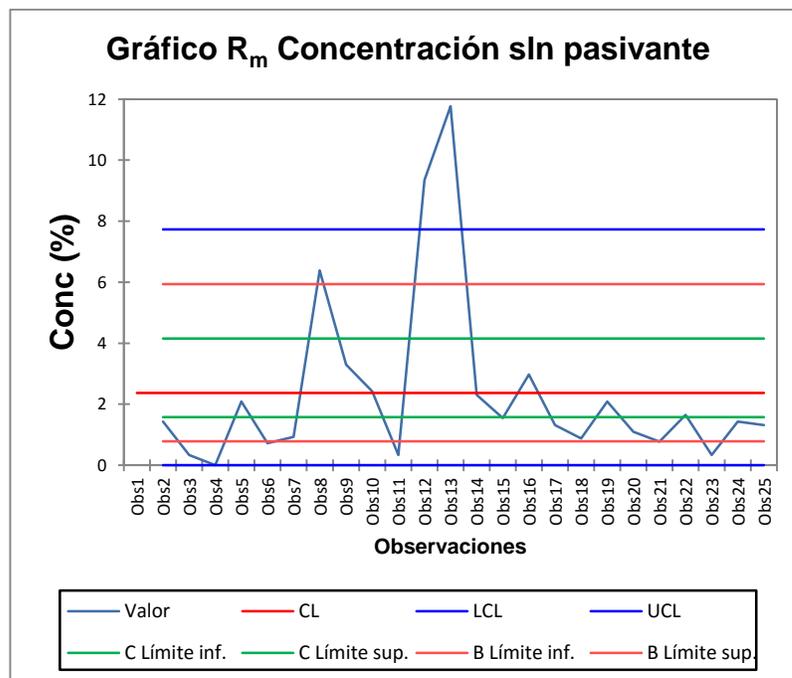


Figura No. 74 Media de Cr^{+6}/Cr^{+3} presente en la solución pasivante aplicada.

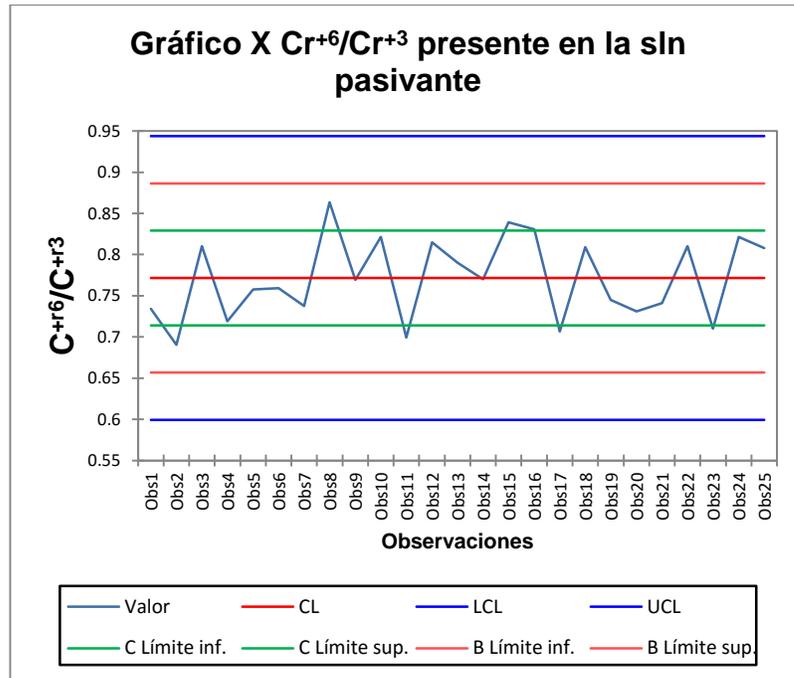
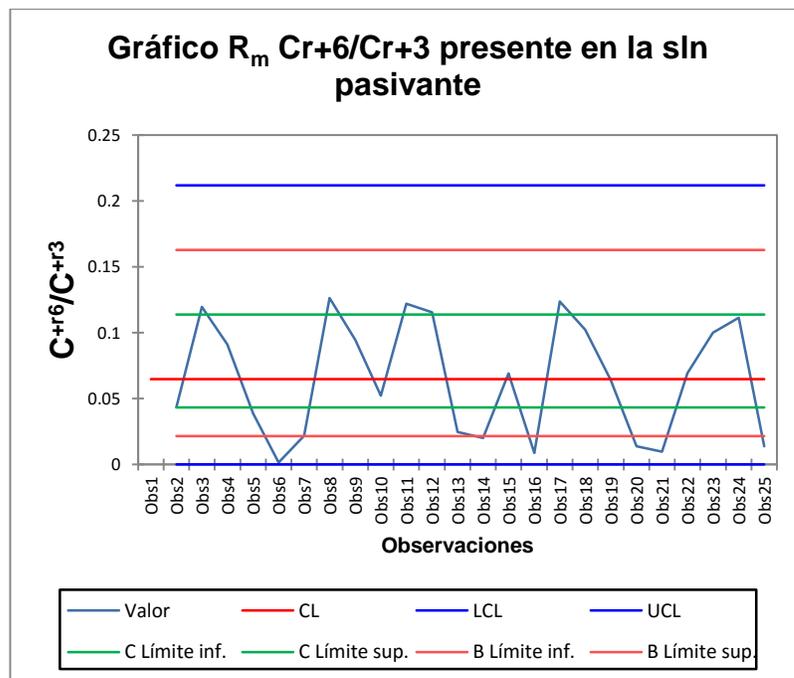


Figura No. 75 Rango de Cr^{+6}/Cr^{+3} presente en la solución pasivante aplicada.



10.4. ANEXO D: Datos originales

Tabla No. 18 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante A en producto terminado.

Muestra	Corrida	Peso inicial (g)	Peso final (g)
A	1	3.531	3.530
	2	3.517	3.514
	3	3.509	3.509
B	1	3.523	3.522
	2	3.540	3.539
	3	3.545	3.542
C	1	3.501	3.498
	2	3.513	3.512
	3	3.506	3.504
D	1	3.494	3.492
	2	3.505	3.502
	3	3.528	3.526
E	1	3.489	3.486
	2	3.501	3.499
	3	3.514	3.511
F	1	3.540	3.537
	2	3.525	3.514
	3	3.539	3.523

Tabla No. 19 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante B en producto terminado.

Muestra	Corrida	Peso inicial (g)	Peso final (g)
A	1	4.779	4.776
	2	4.788	4.787
	3	4.786	4.783
B	1	4.795	4.793
	2	4.818	4.814
	3	4.822	4.820
C	1	4.799	4.797
	2	4.812	4.810
	3	4.821	4.816

Muestra	Corrida	Peso inicial (g)	Peso final (g)
D	1	4.776	4.772
	2	4.798	4.795
	3	4.807	4.804
E	1	4.772	4.768
	2	4.804	4.800
	3	4.792	4.789
F	1	4.770	4.767
	2	4.789	4.785
	3	4.797	4.792

Tabla No. 20 Datos originales obtenidos en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante C en producto terminado.

Muestra	Corrida	Concentración (ppm)
A	1	0.982
	2	0.654
	3	0.570
B	1	0.770
	2	0.880
	3	0.664
C	1	0.849
	2	0.710
	3	0.879
D	1	0.784
	2	0.900
	3	0.843
E	1	0.917
	2	0.951
	3	0.849
F	1	1.121
	2	1.192
	3	1.080

Tabla No. 21 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante A.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
A	1	45	50	95	110
		45	55	95	120
		40	60	100	130
		40	50	100	130
	2	35	60	95	120
		35	65	95	120
		50	65	100	130
		55	65	10	140
	3	55	65	90	130
		55	70	90	120
		55	70	95	120
		50	65	100	130
B	1	50	60	90	95
		40	50	95	100
		30	40	95	95
		30	40	80	100
	2	25	45	80	100
		25	45	85	95
		35	45	95	120
		35	50	95	130
	3	40	60	90	140
		40	60	95	130
		35	60	110	125
		40	65	100	140
C	1	40	50	90	100
		45	45	80	95
		40	40	70	100
		30	45	75	110
	2	30	45	75	100
		40	45	75	80
		40	45	75	90
		30	35	75	90

	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	35	50	90	110
		35	50	95	110
		40	40	95	110
		40	50	100	110
D	1	35	40	55	70
		30	40	50	65
		35	40	55	75
		25	40	60	75
	2	25	40	60	80
		30	35	60	85
		20	40	65	80
		20	30	65	80
	3	20	40	80	85
		20	35	90	90
		25	35	95	90
		25	35	95	90
E	1	30	35	55	55
		20	25	50	55
		20	25	60	65
		20	25	50	55
	2	15	25	50	55
		15	25	50	55
		15	35	50	55
		15	40	50	55
	3	15	35	60	65
		15	35	65	70
		20	30	65	70
		15	30	65	70
F	1	20	25	50	55
		20	25	55	60
		15	25	50	55
		15	20	50	55
	2	10	25	50	55
		10	25	55	60
		15	25	50	55
		15	25	50	55

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	20	30	55	60
		20	20	60	65
		20	20	60	65
		25	20	65	70

Tabla No. 22 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante B.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
A	1	20	50	90	120
		20	65	90	130
		15	80	100	130
		10	90	110	130
	2	10	90	120	140
		10	90	120	140
		10	90	120	130
		15	90	90	145
	3	10	90	100	140
		10	90	110	140
		15	90	110	145
		15	80	120	145
B	1	15	80	90	100
		15	80	90	120
		10	80	90	120
		10	80	90	130
	2	10	80	90	130
		10	75	80	130
		15	75	80	130
		10	80	90	90

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	10	80	80	90
		10	65	70	130
		15	70	85	130
		20	80	90	130
C	1	15	55	90	130
		15	50	90	120
		5	30	85	120
		10	45	80	130
	2	5	20	80	90
		5	20	80	90
		10	30	80	95
		3	25	80	100
	3	10	40	85	130
		5	40	90	100
		0	40	90	120
		0	30	90	140
D	1	35	40	60	65
		35	40	60	65
		20	35	65	70
		20	40	75	80
	2	25	40	75	85
		20	35	75	85
		35	40	90	100
		35	35	100	120
	3	40	45	75	90
		40	45	80	90
		45	50	90	100
		45	50	100	100
E	1	50	55	100	110
		40	40	90	100
		30	35	80	90
		30	35	80	90
	2	25	50	80	100
		25	40	80	90
		30	35	80	90
		35	40	80	100

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	35	40	90	100
		40	45	90	110
		50	55	90	110
		50	55	90	110
F	1	10	25	50	60
		5	15	50	60
		10	25	50	65
		0	20	60	60
	2	5	25	50	60
		5	20	50	60
		10	25	50	60
		10	30	55	65
	3	5	40	55	65
		10	40	50	70
		0	30	50	65
		15	40	55	65

Tabla No. 23 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado con ácido pasivante C.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
A	1	25	25	60	110
		35	35	60	60
		10	15	50	50
		12	12	45	50
	2	15	15	45	50
		10	10	45	50
		10	10	40	40
		12	12	40	30

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	12	12	40	40
		0	5	40	40
		5	5	40	30
		0	0	30	30
B	1	10	20	25	30
		10	20	25	25
		15	15	20	20
		10	10	20	25
	2	5	10	20	25
		5	10	20	25
		5	10	15	20
		5	10	15	20
	3	5	5	10	15
		5	5	10	15
		0	0	10	15
		0	0	15	15
C	1	5	5	5	10
		0	0	5	5
		0	0	0	0
		0	0	0	0
	2	0	0	0	0
		0	0	0	0
		0	0	5	5
		0	0	0	0
	3	5	5	10	0
		5	5	5	5
		5	5	10	15
		10	10	10	15
D	1	5	5	5	5
		0	0	0	5
		0	0	0	5
		0	0	0	0
	2	0	5	5	5
		0	0	0	0
		0	0	0	0
		0	0	0	0

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)			
		A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
	3	5	5	10	10
		5	5	10	10
		10	10	15	15
		15	15	15	15
E	1	0	0	5	5
		0	0	5	5
		0	0	0	0
		0	0	5	5
	2	0	0	0	5
		0	0	5	5
		0	0	0	0
		0	5	5	5
	3	5	5	5	5
		0	0	5	5
		5	5	5	10
		0	0	0	10
F	1	0	5	5	5
		0	0	0	0
		0	0	0	0
		0	0	0	0
	2	0	0	0	0
		0	0	0	5
		3	5	5	5
		3	5	5	5
	3	0	0	0	0
		0	0	0	0
		0	0	3	3
		3	5	5	10

Tabla No. 24 Datos originales obtenidos para ensayo de apilamiento húmedo en producto terminado sin ácido pasivante.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)					
		A 1 día	A los 2 días	A los 7 días	A los 14 días	A los 21 días	A los 28 días
A	1	136	150	150	150	150	150
		136	150	150	150	150	150
		137	150	150	150	150	150
		131	150	150	150	150	150
	2	139	150	150	150	150	150
		129	150	150	150	150	150
		134	150	150	150	150	150
		148	150	150	150	150	150
	3	137	150	150	150	150	150
		140	150	150	150	150	150
		137	150	150	150	150	150
		147	150	150	150	150	150

Tabla No. 25 Condiciones de operación del ensayo de niebla salina.

Hora	Horas evaluadas	Volumen sln (ml)	pH	Concentración (%)	Temperatura (°C)
21	21	153	7	5	35
42	21	194	7	5	35
64	22	335	7	5	36
86	22	170	7	5	35
111	25	210	7	5	36
155	44	329	7	5	35
170	15	120	7	5	36

Tabla No. 26 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante A.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)						
		21 h	42 h	64 h	86 h	111 h	155 h	170 h
A	1	5.568	10.209	21.345	34.338	36.194	42.691	83.525
	2	6.496	11.137	24.129	40.834	38.978	45.475	79.813
	3	6.496	14.849	29.698	35.266	39.906	47.331	77.957
B	1	5.568	17.633	18.561	26.914	42.691	41.762	83.525
	2	4.640	12.065	13.921	16.705	48.259	37.122	74.244
	3	5.568	10.209	14.849	21.345	42.691	38.978	77.029
C	1	7.424	18.561	25.057	40.834	49.187	46.403	94.662
	2	5.568	4.640	13.921	22.273	27.842	26.914	83.525
	3	3.712	6.496	14.849	26.914	32.482	38.978	85.381
D	1	6.496	20.417	23.201	38.978	36.194	41.762	80.741
	2	2.784	14.849	19.489	39.906	32.482	38.978	87.237
	3	2.784	11.137	12.065	23.201	27.842	28.770	86.309
E	1	0.000	7.424	18.561	38.050	31.554	49.187	77.957
	2	0.000	5.568	12.065	20.417	12.993	21.345	85.381
	3	1.856	5.568	12.993	25.057	30.626	41.762	78.885
F	1	0.000	0.000	0.000	1.856	12.993	19.489	83.525
	2	5.568	11.137	12.993	16.705	17.633	15.777	77.957
	3	0.000	0.000	0.928	0.000	4.640	2.784	78.885

Tabla No. 27 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante B.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)						
		21 h	42 h	64 h	86 h	111 h	155 h	170 h
A	1	0.000	9.281	21.345	19.489	25.986	32.482	85.381
	2	0.000	3.712	1.856	8.352	10.209	13.921	87.237
	3	0.000	9.281	13.921	15.777	21.345	20.417	84.453
B	1	0.000	5.568	10.209	10.209	9.281	23.201	77.957
	2	0.000	5.568	9.281	8.352	16.705	19.489	77.957
	3	0.000	4.640	13.921	16.705	27.842	27.842	87.237
C	1	0.000	2.784	6.496	5.568	12.065	12.065	86.309
	2	0.000	14.849	24.129	29.698	26.914	27.842	73.316
	3	0.000	3.712	1.856	7.424	10.209	21.345	60.324
D	1	0.000	4.640	10.209	17.633	21.345	20.417	80.741
	2	0.000	1.856	1.856	3.712	15.777	18.561	94.662
	3	0.000	1.856	4.640	4.640	6.496	22.273	87.237
E	1	0.000	1.856	4.640	9.281	5.568	25.057	84.453
	2	0.000	8.352	11.137	13.921	19.489	25.057	76.101
	3	0.000	0.000	0.928	3.712	5.568	4.640	83.525
F	1	0.000	1.856	8.352	8.352	10.209	14.849	85.381
	2	0.000	3.712	3.712	6.496	9.281	20.417	84.453
	3	0.000	1.856	6.496	6.496	10.209	17.633	77.957

Tabla No. 28 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado con ácido pasivante C.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)						
		21 h	42 h	64 h	86 h	111 h	155 h	170 h
A	1	3.712	7.424	15.777	21.345	27.842	22.273	93.734
	2	7.424	12.993	16.705	18.561	25.057	22.273	86.309
	3	8.352	27.842	34.338	37.122	53.827	53.827	91.877
B	1	6.496	12.065	15.777	20.417	24.129	31.554	89.093
	2	7.424	4.640	9.281	11.137	12.065	21.345	83.525
	3	5.568	7.424	12.065	21.345	23.201	20.417	53.827

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)						
		21 h	42 h	64 h	86 h	111 h	155 h	170 h
		2.784	9.281	11.137	20.417	22.273	29.698	81.669
	2	1.856	5.568	8.352	12.993	10.209	11.137	59.396
	3	2.784	7.424	11.137	9.281	22.273	20.417	85.381
D	1	6.496	8.352	9.281	11.137	16.705	15.777	83.525
	2	4.640	5.568	7.424	6.496	11.137	9.281	59.396
	3	1.856	7.424	7.424	12.993	17.633	21.345	55.683
E	1	1.856	0.928	0.928	0.000	9.281	11.137	86.309
	2	0.000	2.784	4.640	1.856	2.784	21.345	66.820
	3	1.856	7.424	11.137	9.281	18.561	5.568	73.316
F	1	3.712	8.352	5.568	17.633	18.561	18.561	54.755
	2	1.856	0.928	1.856	0.928	1.856	1.856	44.547
	3	0.000	0.928	0.928	0.000	0.000	3.712	61.252

Tabla No. 29 Datos originales obtenidos para ensayo de niebla salina en producto terminado sin ácido pasivante.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)								
		8 h	16 h	21 h	42 h	64 h	86 h	111 h	155 h	170 h
A	1	34.338	51.971	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518
	2	41.762	55.683	92.806	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518
	3	28.77	60.324	94.662	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518	96.518

10.5. ANEXO E: Datos calculados

Tabla No. 30 Datos calculados para la determinación de cromo y concentración del ácido pasivante aplicado.

No. Muestra	Fecha	Cr ⁺⁶ (ml)	Cr total (%vol)	Cr+3 (ml)	Cr ⁺⁶ /Cr ⁺³	Conc (%)	pH
1	13/03/2017	13.800	32.600	18.800	0.734	15.180	2.000
2	14/03/2017	12.500	30.600	18.100	0.691	13.750	2.000
3	15/03/2017	12.800	28.600	15.800	0.810	14.080	2.000
4	16/03/2017	12.800	30.600	17.800	0.719	14.080	2.000
5	17/03/2017	14.700	34.100	19.400	0.758	16.170	2.000
6	19/03/2017	14.500	33.600	19.100	0.759	15.450	2.000
7	21/03/2017	13.200	31.100	17.900	0.737	14.520	2.000
8	22/03/2017	19.000	41.000	22.000	0.864	20.900	2.000
9	23/03/2017	16.000	36.800	20.800	0.769	17.600	2.000
10	25/07/2017	13.800	30.600	16.800	0.821	15.180	2.000
11	26/07/2017	13.500	32.800	19.300	0.699	14.850	2.000
12	27/03/2017	22.000	49.000	27.000	0.815	24.200	2.000
13	30/03/2017	11.300	25.600	14.300	0.790	12.430	2.000
14	2/04/2017	13.400	30.800	17.400	0.770	14.740	2.000
15	4/04/2017	12.000	26.300	14.300	0.839	13.200	2.000
16	7/04/2017	14.700	32.400	17.700	0.831	16.170	2.000
17	9/04/2017	13.500	32.600	19.100	0.707	14.850	2.000
18	10/04/2017	12.700	28.400	15.700	0.809	13.970	3.000
19	11/04/2017	14.600	34.200	19.600	0.745	16.060	2.000
20	18/04/2017	13.600	32.200	18.600	0.731	14.960	2.000
21	19/04/2017	14.300	33.600	19.300	0.741	15.730	2.000
22	20/04/2017	12.800	28.600	15.800	0.810	14.080	2.000
23	21/04/2017	12.500	30.100	17.600	0.710	13.750	3.000
24	23/04/2017	13.800	30.600	16.800	0.821	15.180	2.000
25	24/04/2017	12.600	28.200	15.600	0.808	13.860	3.000

Tabla No. 31 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante A en producto terminado.

Muestra	Corrida	Peso neto pasivante (g)	Deposición (g/m ²)	\bar{X} (g/m ²)	S (g/m ²)
A	1	0.001	0.509	0.679	0.778
	2	0.003	1.528		
	3	0.000	0.000		
B	1	0.001	0.509	0.849	0.588
	2	0.001	0.509		
	3	0.003	1.528		
C	1	0.003	1.528	1.019	0.509
	2	0.001	0.509		
	3	0.002	1.019		
D	1	0.002	1.019	1.188	0.294
	2	0.003	1.528		
	3	0.002	1.019		
E	1	0.003	1.528	1.358	0.294
	2	0.002	1.019		
	3	0.003	1.528		
F	1	0.003	1.528	5.093	3.340
	2	0.011	5.602		
	3	0.016	8.149		

Tabla No. 32 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante B en producto terminado.

Muestra	Corrida	Peso neto deposición pasivante (g)	Deposición (g/m ²)	\bar{X} (g/m ²)	S (g/m ²)
A	1	0.003	1.528	1.188	0.588
	2	0.001	0.509		
	3	0.003	1.528		
B	1	0.002	1.019	1.358	0.588
	2	0.004	2.037		
	3	0.002	1.019		
C	1	0.002	1.019	1.528	0.882
	2	0.002	1.019		
	3	0.005	2.546		

Muestra	Corrida	Peso neto deposición pasivante (g)	Deposición (g/m ²)	\bar{X} (g/m ²)	S (g/m ²)
D	1	0.004	2.037	1.698	0.294
	2	0.003	1.528		
	3	0.003	1.528		
E	1	0.004	2.037	1.867	0.294
	2	0.004	2.037		
	3	0.003	1.528		
F	1	0.003	1.528	2.037	0.509
	2	0.004	2.037		
	3	0.005	2.546		

Tabla No. 33 Datos calculados en la cuantificación de la deposición de ácido pasivante C en producto terminado.

Muestra	Corrida	Concentración (g/m ²)	\bar{X} (g/m ²)	S (g/m ²)
A	1	0.025	0.019	0.006
	2	0.017		
	3	0.015		
B	1	0.020	0.020	0.003
	2	0.022		
	3	0.017		
C	1	0.022	0.021	0.002
	2	0.018		
	3	0.022		
D	1	0.020	0.021	0.001
	2	0.023		
	3	0.021		
E	1	0.023	0.023	0.001
	2	0.024		
	3	0.022		
F	1	0.029	0.029	0.001
	2	0.030		
	3	0.027		

Tabla No. 34 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante A.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)							
		7 días		14 días		21 días		28 días	
		\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	1	42.500	2.887	53.750	4.787	97.500	2.887	122.500	9.574
	2	43.750	10.308	63.750	2.500	75.000	43.397	127.500	9.574
	3	53.750	2.500	67.500	2.887	93.750	4.787	125.000	5.774
B	1	37.500	9.574	47.500	9.574	90.000	7.071	97.500	2.887
	2	30.000	5.774	46.250	2.500	88.750	7.500	111.250	16.520
	3	38.750	2.500	61.250	2.500	98.750	8.539	133.750	7.500
C	1	38.750	6.292	45.000	4.082	78.750	8.539	101.250	6.292
	2	35.000	5.774	42.500	5.000	75.000	0.000	90.000	8.165
	3	37.500	2.887	47.500	5.000	95.000	4.082	110.000	0.000
D	1	31.250	4.787	40.000	0.000	55.000	4.082	71.250	4.787
	2	23.750	4.787	36.250	4.787	62.500	2.887	81.250	2.500
	3	22.500	2.887	36.250	2.500	90.000	7.071	88.750	2.500
E	1	22.500	5.000	27.500	5.000	53.750	4.787	57.500	5.000
	2	15.000	0.000	31.250	7.500	50.000	0.000	55.000	0.000
	3	16.250	2.500	32.500	2.887	63.750	2.500	68.750	2.500
F	1	17.500	2.887	23.750	2.500	51.250	2.500	56.250	2.500
	2	12.500	2.887	25.000	0.000	51.250	2.500	56.250	2.500
	3	21.250	2.500	22.500	5.000	60.000	4.082	65.000	4.082

Tabla No. 35 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante A.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)							
	7 días		14 días		21 días		28 días	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	46.667	5.232	61.667	3.391	88.750	17.024	125.000	8.307
B	35.417	5.949	51.667	4.858	92.500	7.703	114.167	8.969
C	37.083	4.984	45.000	4.694	82.917	4.207	100.417	4.819
D	25.833	4.154	37.500	2.429	69.167	4.680	80.417	3.262
E	17.917	2.500	30.417	5.129	55.833	2.429	60.417	2.500
F	17.083	2.758	23.750	2.500	54.167	3.027	59.167	3.027

Tabla No. 36 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante B.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)							
		7 días		14 días		21 días		28 días	
		\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	1	16.250	4.787	71.250	17.500	97.500	9.574	127.500	5.000
	2	11.250	2.500	90.000	0.000	112.500	15.000	138.750	6.292
	3	12.500	2.887	87.500	5.000	110.000	8.165	142.500	2.887
B	1	12.500	2.887	80.000	0.000	90.000	0.000	117.500	12.583
	2	11.250	2.500	77.500	2.887	85.000	5.774	120.000	20.000
	3	13.750	4.787	73.750	7.500	81.250	8.539	120.000	20.000
C	1	11.250	4.787	45.000	10.801	86.250	4.787	125.000	5.774
	2	5.750	2.986	23.750	4.787	80.000	0.000	93.750	4.787
	3	3.750	4.787	37.500	5.000	88.750	2.500	122.500	17.078
D	1	27.500	8.660	38.750	2.500	65.000	7.071	70.000	7.071
	2	28.750	7.500	37.500	2.887	85.000	12.247	97.500	16.583
	3	42.500	2.887	47.500	2.887	86.250	11.087	95.000	5.774
E	1	37.500	9.574	41.250	9.465	87.500	9.574	97.500	9.574
	2	28.750	4.787	41.250	6.292	80.000	0.000	95.000	5.774
	3	43.750	7.500	48.750	7.500	90.000	0.000	107.500	5.000
F	1	6.250	4.787	21.250	4.787	52.500	5.000	61.250	2.500
	2	7.500	2.887	25.000	4.082	51.250	2.500	61.250	2.500
	3	7.500	6.455	37.500	5.000	52.500	2.887	66.250	2.500

Tabla No. 37 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante B.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)							
	7 días		14 días		21 días		28 días	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	13.333	3.391	82.917	7.500	106.667	10.913	136.250	4.726
B	12.500	3.391	77.083	3.462	85.417	4.771	119.167	17.528
C	6.917	4.187	35.417	6.863	85.000	2.429	113.750	9.213
D	32.917	6.349	41.250	2.758	78.750	10.135	87.500	9.809
E	36.667	7.287	43.750	7.752	85.833	3.191	100.000	6.783
F	7.083	4.710	27.917	4.623	52.083	3.462	62.917	2.500

Tabla No. 38 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante C.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)							
		7 días		14 días		21 días		28 días	
		\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	1	20.500	11.733	21.750	10.436	53.750	7.500	67.500	28.723
	2	11.750	2.363	11.750	2.363	42.500	2.887	42.500	9.574
	3	4.250	5.679	5.500	4.933	37.500	5.000	35.000	5.774
B	1	11.250	2.500	16.250	4.787	22.500	2.887	25.000	4.082
	2	5.000	0.000	10.000	0.000	17.500	2.887	22.500	2.887
	3	2.500	2.887	2.500	2.887	11.250	2.500	15.000	0.000
C	1	1.250	2.500	1.250	2.500	2.500	2.887	3.750	4.787
	2	0.000	0.000	0.000	0.000	1.250	2.500	1.250	2.500
	3	6.250	2.500	6.250	2.500	8.750	2.500	8.750	7.500
D	1	1.250	2.500	1.250	2.500	1.250	2.500	3.750	2.500
	2	0.000	0.000	1.250	2.500	1.250	2.500	1.250	2.500
	3	8.750	4.787	8.750	4.787	12.500	2.887	12.500	2.887
E	1	0.000	0.000	0.000	0.000	3.750	2.500	3.750	2.500
	2	0.000	0.000	1.250	2.500	2.500	2.887	3.750	2.500
	3	2.500	2.887	2.500	2.887	3.750	2.500	7.500	2.887
F	1	0.000	0.000	1.250	2.500	1.250	2.500	1.250	2.500
	2	1.500	1.732	2.500	2.887	2.500	2.887	3.750	2.500
	3	0.750	1.500	1.250	2.500	2.000	2.449	3.250	4.717

Tabla No. 39 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado con ácido pasivante C.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)							
	7 días		14 días		21 días		28 días	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	12.167	6.592	13.000	5.911	44.583	5.129	48.333	14.690
B	6.250	1.796	9.583	2.558	17.083	2.758	20.833	2.323
C	2.500	1.667	2.500	1.667	4.167	2.629	4.583	4.929
D	3.333	2.429	3.750	3.262	5.000	2.629	5.833	2.629
E	0.833	0.962	1.250	1.796	3.333	2.629	5.000	2.629
F	0.750	1.077	1.667	2.629	1.917	2.612	2.750	3.239

Tabla No. 40 Datos calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado sin ácido pasivante.

Muestra	Corrida	Superficie con óxido (cm ²)											
		1 día		2 días		7 días		14 días		21 días		28 días	
		\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	1	135.000	2.708	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000
	2	137.500	8.103	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000
	3	140.250	4.717	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000

Tabla No. 41 Promedios calculados para el ensayo de apilamiento húmedo del producto terminado sin ácido pasivante.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)											
	1 día		2 días		7 días		14 días		21 días		28 días	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	137.583	5.176	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000	150.000	0.000

Tabla No. 42 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante A.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)													
	21 h		42 h		64 h		86 h		111 h		155 h		170 h	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	6.187	0.536	12.065	2.455	25.057	4.253	36.813	3.514	38.360	1.932	45.165	2.336	80.431	2.835
B	5.259	0.536	13.302	3.864	15.777	2.455	21.655	5.111	44.547	3.215	39.288	2.336	78.266	4.762
C	5.568	1.856	9.899	7.559	17.942	6.179	30.007	9.660	36.503	11.227	37.432	9.836	87.856	5.967
D	4.022	2.143	15.468	4.671	18.252	5.671	34.029	9.388	32.173	4.185	36.503	6.841	84.762	3.514
E	0.619	1.072	6.187	1.072	14.540	3.514	27.842	9.140	25.057	10.459	37.432	14.417	80.741	4.045
F	1.856	3.215	3.712	6.430	4.640	7.248	6.187	9.156	11.755	6.584	12.683	8.772	80.122	2.983

Tabla No. 43 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante B.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)													
	21 h		42 h		64 h		86 h		111 h		155 h		170 h	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	0.000	0.000	7.424	3.215	12.374	9.836	14.540	5.671	19.180	8.108	22.273	9.419	85.690	1.418
B	0.000	0.000	5.259	0.536	11.137	2.455	11.755	4.386	17.942	9.342	23.511	4.185	81.050	5.358
C	0.000	0.000	7.115	6.714	10.827	11.751	14.230	13.427	16.396	9.156	20.417	7.929	73.316	12.993
D	0.000	0.000	2.784	1.607	5.568	4.253	8.662	7.783	14.540	7.501	20.417	1.856	87.547	6.966
E	0.000	0.000	3.403	4.386	5.568	5.167	8.971	5.111	10.209	8.037	18.252	11.788	81.359	4.578
F	0.000	0.000	2.475	1.072	6.187	2.336	7.115	1.072	9.899	0.536	17.633	2.784	82.597	4.045

Tabla No. 44 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado con ácido pasivante C.

Muestra	Superficie con óxido (cm ²)													
	21 h		42 h		64 h		86 h		111 h		155 h		170 h	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	7.500	2.455	16.086	10.554	22.273	10.459	25.676	10.010	35.575	15.868	32.791	18.218	90.640	3.864
B	6.496	0.928	8.043	3.751	12.374	3.259	17.633	5.645	19.799	6.714	24.439	6.179	75.482	18.959
C	2.475	0.536	7.424	1.856	10.209	1.607	14.230	5.671	18.252	6.966	20.417	9.281	75.482	14.054
D	4.331	2.336	7.115	1.418	8.043	1.072	10.209	3.346	15.158	3.514	15.468	6.038	66.201	15.117
E	1.237	1.072	3.712	3.346	5.568	5.167	3.712	4.911	10.209	7.929	12.683	8.001	75.482	9.923
F	1.856	1.856	3.403	4.287	2.784	2.455	6.187	9.923	6.806	10.223	8.043	9.156	53.518	8.421

Tabla No. 45 Datos calculados para el ensayo de niebla salina del producto terminado sin ácido pasivante.

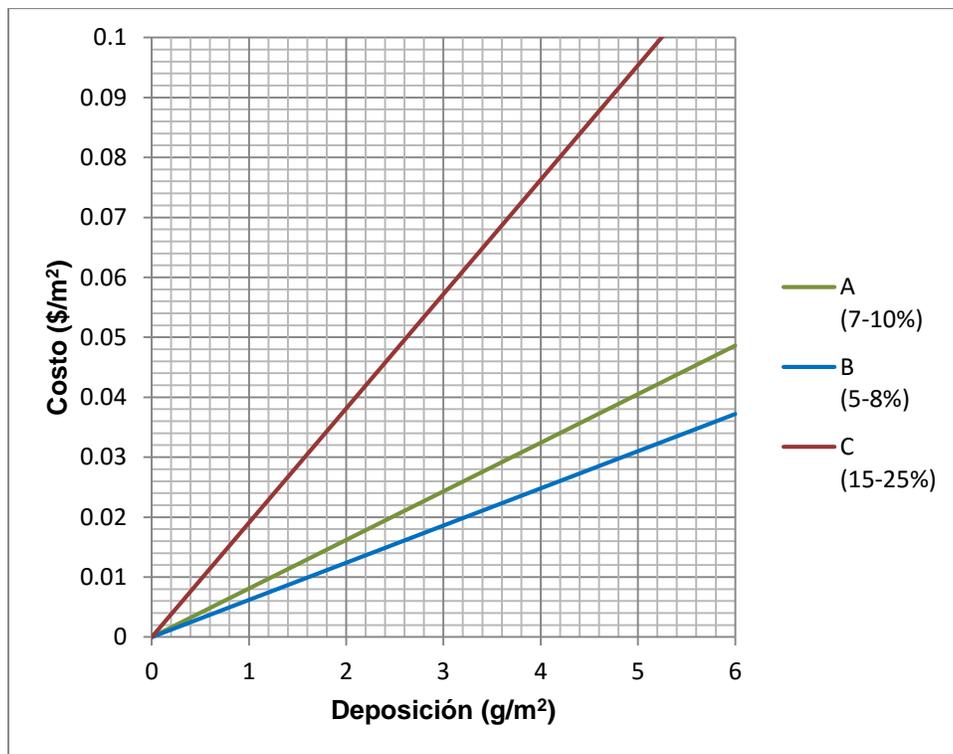
Muestra	Superficie con óxido (cm ²)									
	8 h		16 h		21 h		42 h		64 h	
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)
A	34.957	6.518	55.993	4.185	94.662	1.856	96.518	0.000	96.518	0.000
	86 h		111 h		155 h		170 h			
	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)	\bar{X} (cm ²)	S (cm ²)		
	96.518	0.000	96.518	0.000	96.518	0.000	96.518	0.000		

10.6 ANEXO F: Tabla costos de ácido pasivante

Tabla No. 46 Costos aproximados de cada solución pasivante.

Ácido pasivante	Costo aproximado del ácido pasivante a la concentración adquirida		Costo aproximado del ácido pasivante a la concentración utilizada		Costo aproximado del ácido pasivante en la medida utilizada
	\$/gal	Concentración	\$/gal	Concentración	\$/g
A	50.49	10.30%	41.67	7 - 10%	0.008
B	50.49	10.30%	31.86	5 - 8%	0.006
C	98.04	15 - 25%	98.04	15 - 25%	0.019

Figura No. 76 Gráfica del costo aproximado esperado de cada ácido pasivante según la deposición utilizada.



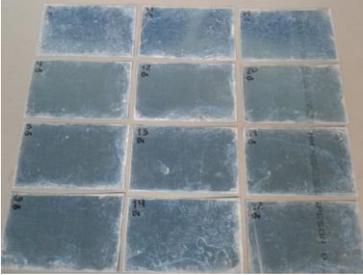
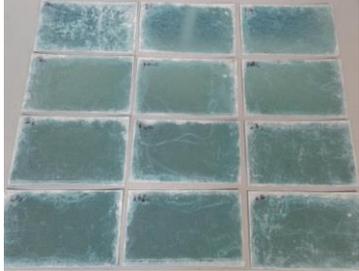
10.7 ANEXO G: Tabla de constantes de gráficos de control

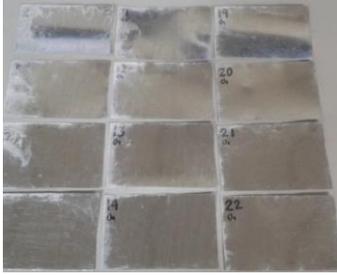
Figura No. 77 Constantes para gráficos de control

Constantes para Gráficos de Control																
n	A	A2	A3	c4	1/c4	B3	B4	B5	B6	d2	d3	1/d2	D1	D2	D3	D4
2	2.121	1.880	2.659	0.798	1.253	0.000	3.267	0.000	2.606	1.128	0.853	0.886	0.000	3.686	0.000	3.267
3	1.732	1.023	1.954	0.886	1.128	0.000	2.568	0.000	2.276	1.693	0.888	0.591	0.000	4.358	0.000	2.575
4	1.500	0.729	1.628	0.921	1.085	0.000	2.266	0.000	2.088	2.059	0.880	0.486	0.000	4.698	0.000	2.282
5	1.342	0.577	1.427	0.940	1.064	0.000	2.089	0.000	1.964	2.326	0.864	0.430	0.000	4.918	0.000	2.114
6	1.225	0.483	1.287	0.952	1.051	0.030	1.970	0.029	1.874	2.534	0.848	0.395	0.000	5.079	0.000	2.004
7	1.134	0.419	1.182	0.959	1.042	0.118	1.882	0.113	1.806	2.704	0.833	0.370	0.205	5.204	0.076	1.924
8	1.061	0.373	1.099	0.965	1.036	0.185	1.815	0.179	1.751	2.847	0.820	0.351	0.388	5.307	0.136	1.864
9	1.000	0.337	1.032	0.969	1.032	0.239	1.761	0.232	1.707	2.970	0.808	0.337	0.547	5.394	0.184	1.816
10	0.949	0.308	0.975	0.973	1.028	0.284	1.716	0.276	1.669	3.078	0.797	0.325	0.686	5.469	0.223	1.777
11	0.905	0.285	0.927	0.975	1.025	0.321	1.679	0.313	1.637	3.173	0.787	0.315	0.811	5.535	0.256	1.744
12	0.866	0.266	0.886	0.978	1.023	0.354	1.646	0.346	1.610	3.258	0.778	0.307	0.923	5.594	0.283	1.717
13	0.832	0.249	0.850	0.979	1.021	0.382	1.618	0.374	1.585	3.336	0.770	0.300	1.025	5.647	0.307	1.693
14	0.802	0.235	0.817	0.981	1.019	0.406	1.594	0.398	1.563	3.407	0.763	0.294	1.118	5.696	0.328	1.672
15	0.775	0.223	0.789	0.982	1.018	0.428	1.572	0.421	1.544	3.472	0.756	0.288	1.203	5.740	0.347	1.653
16	0.750	0.212	0.763	0.983	1.017	0.448	1.552	0.440	1.527	3.532	0.750	0.283	1.282	5.782	0.363	1.637
17	0.728	0.203	0.739	0.985	1.016	0.466	1.534	0.459	1.510	3.588	0.744	0.279	1.356	5.820	0.378	1.622
18	0.707	0.194	0.718	0.985	1.015	0.482	1.518	0.475	1.496	3.640	0.739	0.275	1.424	5.856	0.391	1.609
19	0.688	0.187	0.698	0.986	1.014	0.497	1.503	0.490	1.483	3.689	0.733	0.271	1.489	5.889	0.404	1.596
20	0.671	0.180	0.680	0.987	1.013	0.510	1.490	0.503	1.470	3.735	0.729	0.268	1.549	5.921	0.415	1.585
21	0.655	0.173	0.663	0.988	1.013	0.523	1.477	0.516	1.459	3.778	0.724	0.265	1.606	5.951	0.425	1.575
22	0.640	0.167	0.647	0.988	1.012	0.534	1.466	0.528	1.448	3.819	0.720	0.262	1.660	5.979	0.435	1.565
23	0.626	0.162	0.633	0.989	1.011	0.545	1.455	0.539	1.438	3.858	0.716	0.259	1.711	6.006	0.443	1.557
24	0.612	0.157	0.619	0.989	1.011	0.555	1.445	0.549	1.429	3.895	0.712	0.257	1.759	6.032	0.452	1.548
25	0.600	0.153	0.606	0.990	1.010	0.565	1.435	0.559	1.420	3.931	0.708	0.254	1.805	6.056	0.459	1.541

Fuente: Hernández (2008)

10.8 ANEXO H: Recopilación de imágenes

 <p>Sistema utilizado para ensayos volumétricos</p>	 <p>Proceso de determinación de Cr^{+6} en pasivante</p>	 <p>Proceso de determinación de Cr^{+6} en pasivante</p>
 <p>Proceso de determinación de cromo total en pasivante</p>	 <p>Preparación de ensayo de apilamiento húmedo</p>	 <p>Acero galvanizado en ensayo de apilamiento húmedo</p>
 <p>Exposición de ensayo de apilamiento húmedo a condiciones atmosféricas</p>	 <p>Evaluación de resultados de ensayo de apilamiento húmedo al producto con pasivante color azul</p>	 <p>Evaluación de resultados de ensayo de apilamiento húmedo al producto con pasivante color verde</p>



Evaluación de resultados de ensayo de apilamiento húmedo al producto con pasivante sin color



Cámara de niebla salina previo al inicio del ensayo de niebla salina



Evaluación de cámara de niebla salina



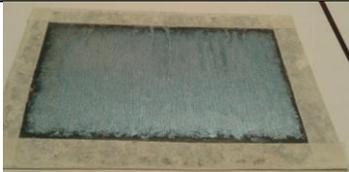
Evaluación del volumen de solución salina aplicada en ensayo de niebla salina



Evaluación del pH de la cámara salina en ensayo de niebla salina



Evaluación de resultados de ensayo de niebla salina al producto con pasivante sin color



Evaluación de resultados de ensayo de niebla salina al producto con pasivante color azul



Evaluación de resultados de ensayo de niebla salina al producto con pasivante color verde

10.9 ANEXO I: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante A, expuesto a ensayo de apilamiento húmedo.

0 días	7 días	14 días	21 días	28 días
				

10.10 ANEXO J: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante B, expuesto a ensayo de niebla salina.

0 horas	21 horas	64 horas	111 horas	170 horas
				

10.11 ANEXO K: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado con ácido pasivante C, expuesto a ensayo de apilamiento húmedo.

0 días	7 días	14 días	21 días	28 días
				

10.12 ANEXO L: Ejemplo de corrosión de acero galvanizado sin ácido pasivante, expuesto a ensayo de niebla salina.

0 horas	21 horas	64 horas	111 horas	170 horas
