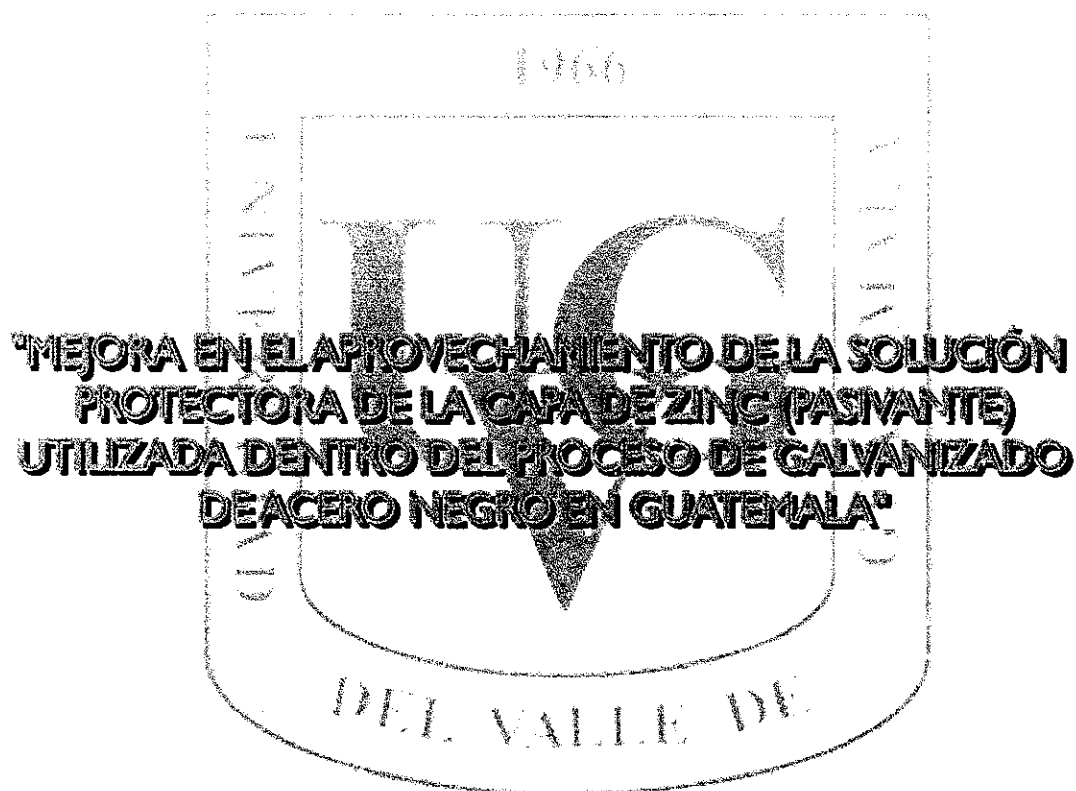


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

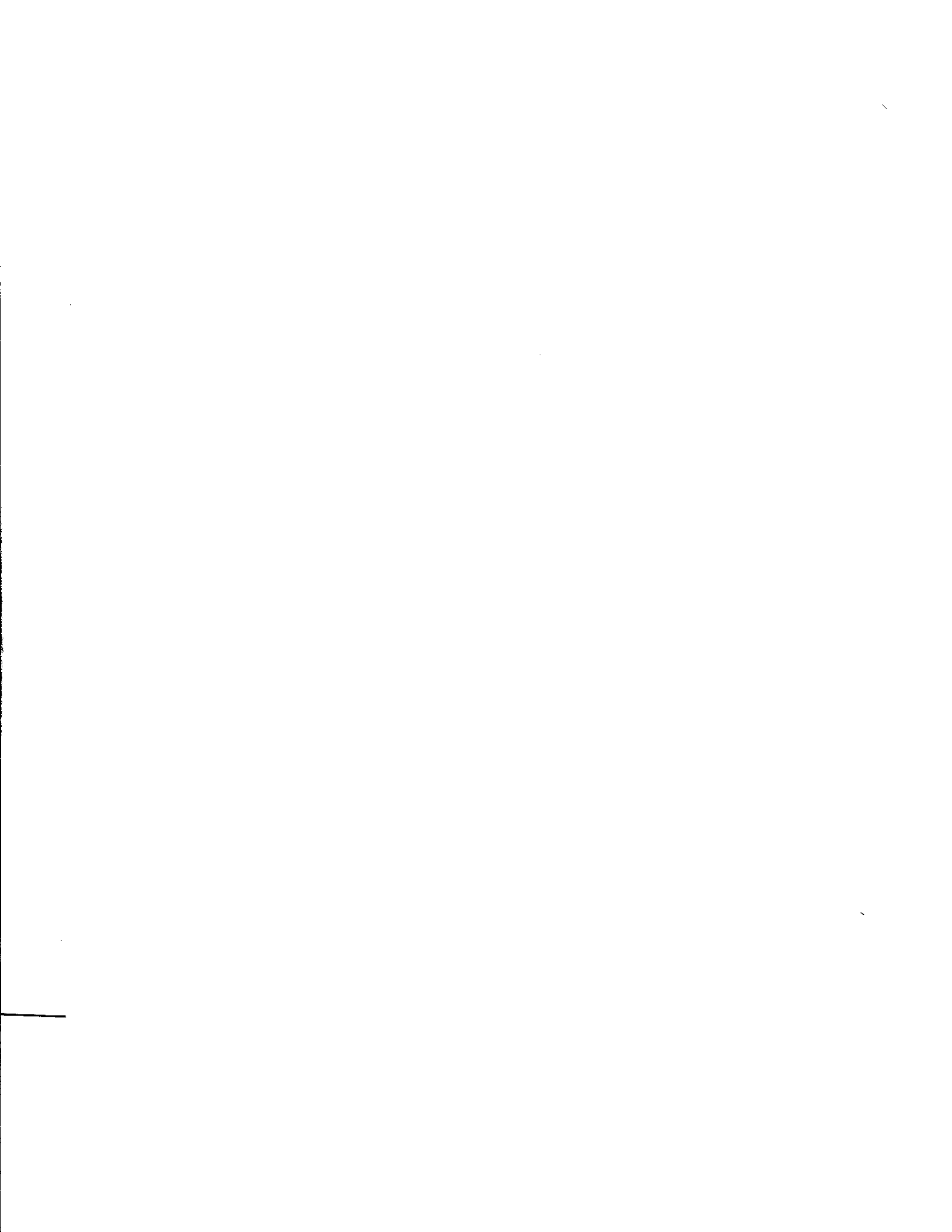
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Excelencia que trasciende

BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN 2005



**"MEJORA EN EL APROVECHAMIENTO DE LA SOLUCIÓN
PROTECTORA DE LA CAPA DE ZINC (PASIVANTE)
UTILIZADA DENTRO DEL PROCESO DE GALVANIZADO
DE ACERO NEGRO EN GUATEMALA"**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Excelencia que trasciende

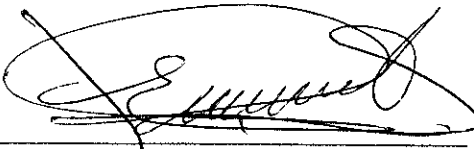
**MEJORA EN EL APROVECHAMIENTO DE LA SOLUCIÓN
PROTECTORA DE LA CAPA DE ZINC (PASIVANTE)
UTILIZADA DENTRO DEL PROCESO DE GALVANIZADO
DE ACERO NEGRO EN GUATEMALA^o**

*Trabajo de investigación presentado por
JOSÉ FERNANDO MENDOZA PÉREZ
para optar al grado académico de
LICENCIADO EN INGENIERÍA QUÍMICA*

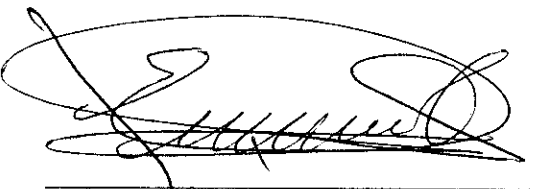
GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN 2005

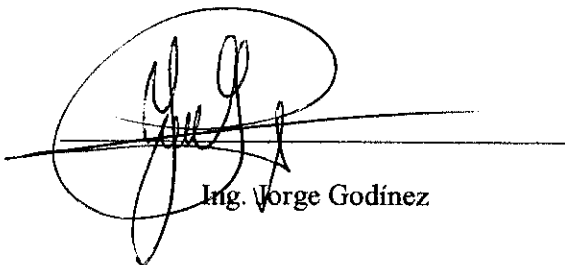
BIBLIOTECA
DE LA
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

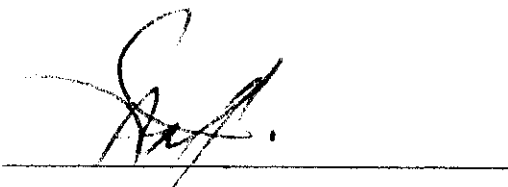
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. José Eduardo Calderón
Asesor

Tribunal:

(f) 
Ing. José Eduardo Calderón

(f) 
Ing. Jorge Godínez

(f) 
Ing. Federico Salazar

Fecha de aprobación: 20 de mayo de 2005

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo consistió en mejorar el aprovechamiento de la cantidad de pasivante utilizado dentro del proceso de galvanizado de acero negro en Guatemala. Utilizando para este propósito, un mecanismo de corrosión acelerada dentro de una cámara salina, con el cual se determinó y mejoró el grado de aprovechamiento actual de un conjunto de muestras escogidas al azar.

Tomando como punto de partida, el desarrollo de toda la experimentación dentro de un marco real, proporcionado por una de las industrias galvanizadoras más importantes que operan en Guatemala. Con lo cual, se determinó que, efectivamente, existen dos espesores distintos de acero (dentro de los seis que se tomaron en cuenta), en los cuales el aprovechamiento del pasivante no estaba siendo el mejor, por lo que se encontró mediante pruebas de ensayo-error, la concentración ideal, con la cual se obtenía una durabilidad del material que cumpliera con los estándares de calidad preestablecidos por dicha empresa y de esta manera, se logró cumplir con el objetivo del proyecto, dando como resultado la percepción de un ahorro neto unitario de Q 0.311 y Q 0.077 para espesores base de acero de 0.32 y 0.36 milímetros, respectivamente. Encontrando a su vez, concentraciones idóneas de pasivante del 12.3 % (v/v) y del 12.47 % (v/v), para ambos espesores respectivamente.

ÍNDICE GENERAL

	No. Pág.
RESUMEN	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS	viii
Capítulos	
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	
A. Óxido blanco - prevención y cura	2
B. Tratamiento de superficies galvanizadas afectadas por óxido blanco	3
C. Mecanismo de formación de película protectora (pasivante).....	5
D. Factores que afectan la calidad y la velocidad de formación de la película de cromo.....	6
E. Contaminación de la solución.....	7
F. Manejo y funciones de la cámara salida – prueba B117.....	9
G. Determinación de deposición de pasivante en lámina	13
III. JUSTIFICACIÓN	14
IV. OBJETIVOS	
A. General	16
B. Específicos	16
V. PROBLEMA A RESOLVER	17
VI. METODOLOGÍA	18
VII. RESULTADOS	20
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	24

	No. Pág.
IX. CONCLUSIONES	27
X. RECOMENDACIONES	28
XI. BIBLIOGRAFÍA	29
XII. ANEXOS	31

ÍNDICE DE TABLAS

No.	TÍTULO	No. Pág.
1	Presiones y temperaturas sugeridas para la torre de saturación de aire en prueba BI 17	16
2	Distribución de muestras seleccionadas	25
3	Resultados obtenidos sobre muestras analizadas	27
4	Resultados obtenidos sobre muestras con especificaciones corregidas	30
5	Resultados finales del ahorro percibido luego de mejorar el aprovechamiento del pasivante utilizado	30
6	Distribución de muestras de acero galvanizado analizadas	38
7	Especificaciones corregidas para espesores donde se desea mejorar el aprovechamiento del pasivante	39

ÍNDICE DE GRÁFICAS

No.	TÍTULO	No. Pág.
1	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.15 mm	27
2	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.29 mm	28
3	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.32 mm	28
4	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.36 mm	29
5	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.43 mm	29
6	Resultados de oxidación acelerada para acero galvanizado espesor 0.70 mm	30
7	Relación de oxidación entre cuatro espesores distintos protegidos con la misma cantidad de pasivante y capa de galvanizado variable	32
8	Relación de oxidación entre cuatro espesores distintos protegidos con la misma cantidad de pasivante y la misma capa de galvanizado	33

I. INTRODUCCIÓN

El proceso de galvanizado de acero negro posee como culminación la adición de una película protectora del zinc, llamada pasivante, la cual previene y atrasa la formación de óxido blanco sobre la superficie galvanizada. Razón por la cual, dicho pasivante, juega un papel sumamente importante dentro del proceso, por lo que se torna necesario el mantener un nivel de aprovechamiento máximo de esta materia prima.

Partiendo de este precedente, se sometió una población total de 30 muestras de acero galvanizado (considerando seis espesores distintos), a la prueba fisicoquímica B117 para cámaras salinas (Ver antecedentes, pág. 10). Esto permitió obtener los valores idóneos de concentración de pasivante para cada espesor con los cuales se mantuvo la calidad en el grado de protección que se brinda a la capa de zinc, de acuerdo a los estándares de calidad que se deseaba, y de acuerdo a estos estándares, se mejoró el grado de aprovechamiento que se estaba teniendo del pasivante, luego de corregir aquellos casos en los que se estaba utilizando una cantidad mayor, de dicha solución protectora, de la que realmente se requiere para cumplir con las normas de calidad preestablecidas por la empresa galvanizadora considerada.

II. ANTECEDENTES

A. ÓXIDO BLANCO: PREVENCIÓN Y CURA

El óxido blanco es uno de los problemas comúnmente encontrados en las capas de galvanizado de cualquier clase. Este se manifiesta como un depósito blanco y polvoriento que se forma rápidamente sobre la superficie de las capas de galvanizado cuando se encuentran bajo condiciones específicas. (Johnson 1991).

En general, la formación del óxido blanco ocurre principalmente durante el almacenamiento y se acelera por la presencia de humedad y condensación. Cuando la lámina se expone al aire, la superficie queda sujeta a la oxidación y se forma una película muy delgada de óxido en dicha superficie. Esta película de óxido protege la lámina mientras el aire sea seco, pero si es húmedo y la lámina se mantiene expuesta por mucho tiempo, la humedad ayuda a que el zinc se combine con el dióxido de carbono en el aire, formando así óxido blanco pulverizado que se fija en la superficie. (Johnson 1991).

El óxido blanco puede causar daños considerables a las capas de galvanizado. La superficie galvanizada contiene casi un 100 % de Zinc y es su durabilidad la que provee un efecto anticorrosivo en el acero. Aunque el Zinc es todavía considerado como un metal reactivo, son los óxidos estables que se forman en su superficie los que determinan su durabilidad. (Johnson 1991).

Existe un gran número de pasos simples los cuales pueden ser utilizados para reducir o para eliminar por completo la formación de óxido blanco. Estos pasos son:

1. Mantener el material empacado (lámina galvanizada) en un ambiente seco.
2. Se deben embarcar las hojas de manera que se permita la circulación de aire alrededor y entre ellas.
3. Se deben colocar los paquetes almacenados con cierto grado de inclinación, de manera que si algún líquido llegara a caer sobre la superficie del material, se logre drenar el mismo de manera espontánea.
4. Tratar la superficie galvanizada con un repelente de agua apropiado o con algún tipo de capa protectora que prevenga el contacto de mezcla con la superficie.

(Johnson 1991).

B. TRATAMIENTO DE SUPERFICIES GALVANIZADAS AFECTADAS POR ÓXIDO BLANCO

Una vez la superficie galvanizada esté afectada y los componentes del Hidróxido de Zinc se hallan formado, es deseable remover el óxido de la superficie por los siguientes factores:

- Su presencia inhibe la formación de óxidos estables de carbono
- Causa una mala presentación del producto

(Johnson 1991).

Los efectos de las superficies galvanizadas van desde casos menores a extremos y existen distintas formas de tratarlos para cada uno de los casos que se presente, entre los distintos tratamientos se encuentran los siguientes: (Johnson 1991).

1. ÓXIDO BLANCO LEVE. Se caracteriza por la formación de una capa delgada de residuo de polvo blanco y ocurre generalmente con productos recientemente galvanizados durante períodos de fuertes lluvias. Es particularmente evidente en áreas que han sido pulidas en la etapa de control de calidad. Estos tratamientos remueven la superficie pasivada de la galvanizada, exponiendo el Zinc que no está oxidado para que reaccione con el agua de lluvia. Luego de que los productos han sido ventilados y secados, el óxido blanco raramente progresa de esta etapa superficial. En este nivel no es requerido ningún tratamiento. (Harvey 1995).

2. ÓXIDO BLANCO MODERADO. Se caracteriza por manchas oscuras que se sitúan en la superficie galvanizada, sobre el área afectada, con la aparición del óxido blanco. El espesor de la capa de galvanizado debe revisarse para determinar hasta dónde se ha extendido el daño al galvanizado. En la mayoría de los casos, menos de un 5% de la capa de galvanizado será removida, por lo que no es necesaria ninguna medida de tratamiento, mientras la apariencia del área afectada no sea perjudicial para el uso del producto y los residuos de Hidróxido de Zinc sean removidos con cepillo de alambre. Si la apariencia del producto es inaceptable, el óxido blanco puede ser tratado de la siguiente manera:

- a. Cepillar el área afectada para remover el óxido.
- b. Humedecer con pintura de aluminio un pedazo de tela y aplicar una capa fina de pintura sobre el área afectada.

(Johnson 1991).

3. **ÓXIDO BLANCO SEVERO.** Se caracteriza por depósitos grandes de óxido sobre la superficie galvanizada. Las áreas afectadas pueden presentarse en color negro y muestran signos de polvo rojizo. El espesor de la capa de galvanizado debe revisarse para determinar hasta donde se ha extendido el daño. El tratamiento para rehabilitar la superficie debe realizarse así:

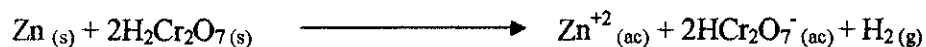
- a. Cepillar el área afectada para remover el óxido y cualquier otro material.
- b. Aplicar una o dos capas de recubrimiento de pintura para Zinc para lograr una capa de 100 micras de espesor.

(Johnson 1991).

C. MECANISMO DE FORMACIÓN DE LA PELÍCULA PROTECTORA (PASIVANTE)

La película es formada por la reacción química del Cromo Hexavalente (Cromo VI) con el metal de la superficie (Zinc), en un medio ácido. El Cromo VI es parcialmente reducido a Cromo Trivalente (Cromo III) durante la reacción, formando una mezcla compleja de hidruros de Cromo y Zinc. La composición de la película es indefinida, ya que contiene cantidades variables de los reactivos, productos de la reacción y agua de hidratación, así como iones de otras especies asociados al sistema. Esta reacción puede dividirse en tres etapas: (Kunz 1990).

1. En Zinc es disuelto por el Ácido Crómico, elevándose el pH de la solución en la proximidad de la superficie. Esta etapa es la más importante, por lo que el pH debe mantenerse en el rango de 1.2 a 1.6, para que ocurra la reacción:



(Kunz 1990).

2. El aumento de pH permite la precipitación de algunos hidróxidos con lo que el Ion Cromato se vuelve estable:



(Kunz 1990).

3. Una película de Cromo-Cromato se forma en la superficie del metal:



(Kunz 1990).

D. FACTORES QUE AFECTAN LA CALIDAD Y LA VELOCIDAD DE LA FORMACIÓN DE LA PELÍCULA DE CROMO

1. METAL BASE. La conversión de la capa de Cromo se ve afectada por las impurezas codepositadas con el Zinc. El exceso de impurezas provoca películas de Cromo de tonalidades oscuras indeseables en el producto. (Kunz 1990).

2. pH. Uno de los factores más importantes que controlan la formación de la película de Cromo es el pH de la solución.

Para cada sistema Metal-Cromato, existe un pH al cual la velocidad de formación de la película de recubrimiento es máxima. Si se baja el valor del pH, los productos de la reacción se vuelven más solubles, con tendencia a mantenerse en solución en lugar de depositarse como recubrimiento en la superficie del metal. En tanto, la velocidad de disolución de estos productos se incrementa, el grosor de la película se mantendrá bajo. (Kunz 1990).

Los incrementos del pH por encima del valor máximo permitido bajará gradualmente la velocidad de disolución del metal (Zinc) y la formación de la película, hasta el punto en el que cesa la reacción. (Kunz 1990).

E. CONTAMINACIÓN DE LA SOLUCION

Una fuente común de contaminación proviene de una limpieza inadecuada. Otros contaminantes que deben tomarse en cuenta son aquellos producidos por las reacciones que se llevan a cabo en la misma solución pasivante. Con muy pocas excepciones, parte del Cromo III formado y parte del metal disuelto durante la reacción permanecen en solución. Pequeñas concentraciones de estos contaminantes pueden ayudar a obtener mejores resultados. Si la concentración de los mismos se incrementa, la formación de la película puede ser inhibida.(2).

Por un período de tiempo, este efecto puede contrarrestarse ajustando, tanto el pH como la concentración del Cromo VI.

c. Cuando la solución del tanque de crómico se encuentre contaminada, ésta deberá descartarse para evitar tener manchas indeseables en la lámina y la inactivación de la reacción entre la capa de galvanizado y el cromo. Si las descargas son muy frecuentes o de volúmenes grandes, se deberá considerar tratar el crómico para poderlo reciclar y no incurrir en gastos excesivos de materia prima. Este proceso podría hacerse de la siguiente forma:

1. Filtración de la solución para retener los sólidos en suspensión.
2. Tratamiento de la solución con resinas para eliminar los iones en solución.
3. Acidificación de la solución al pH recomendado para activar el Cromo VI.

(2).

F. MANEJO Y FUNCIONES DE LA CÁMARA SALINA – PRUEBA B117

1. APARATO. El aparato requerido para la exposición de niebla salina consiste en una cámara de niebla, un depósito de solución salina, abastecimiento de aire comprimido, una o más boquillas atomizadores, muestras de las pruebas, provisión de calor para la cámara y los instrumentos de control necesarios. El tamaño del aparato y otros detalles de construcción son opcionales, mientras se llene con los requisitos: (5).

- a. No debe permitirse que las gotas de la solución que se acumulan en el techo o cubierta de la cámara caigan sobre la muestra que está expuesta.
- b. Las gotas que se acumulan en el techo o en la cubierta de la cámara no deben regresar al depósito salino ni volver a rociarse sobre la muestra.
- c. El material de construcción de la máquina debe resistir la corrosión de la neblina.

d. El agua que se utiliza para la práctica de la cámara salina debe ser libre de minerales, haluros y sólidos en suspensión. (5).

2. MUESTRAS PARA PRUEBAS. La clase y el número de muestras que se analizan y el criterio de evaluación se basa conforme a las necesidades de la empresa. (5).

3. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS

a. Las muestras que se analizarán deben ser previamente limpiadas. El método de limpieza es opcional y depende de la naturaleza, superficie y los contaminantes. Se debe tener especial cuidado en el manejo de las muestras, a modo de no contaminarlas después de que han sido lavadas.

b. Las muestras que se utilizan para analizar la pintura y las capas del material deben prepararse de acuerdo a las especificaciones del material que será expuesto.

c. Las muestras cubiertas con pintura o con capas no metálicas no deben limpiarse ni manipularse tiempo antes de la prueba.

d. Siempre que se desee determinar el avance de la corrosión de un área desgastada, debe hacerse una raya con instrumento afilado, de modo que traspase la pintura o cualquier otra cubierta, de esta manera el metal quedará expuesto para que se puede proceder a la prueba.

(5).

4. POSICION DE LAS MUESTRAS DURANTE LA EXPOSICIÓN. La posición de las muestras dentro de la cámara salina debe hacerse de la siguiente manera:

- a. Las muestras deben colocarse suspendidas en forma vertical entre 15 y 30°C, de preferencia, paralelamente a la dirección del flujo principal de la niebla dentro de la cámara.
- b. Las muestras no deben tocarse entre sí ni con ningún tipo de material metálico o material que pueda funcionar como puente conductor de electrones.
- c. Cada muestra debe ser colocada dentro de la cámara de manera que reciba la misma tasa de niebla salina por unidad de tiempo.
- d. El condensado salino que se deposita sobre cada muestra no debe caer sobre ninguna otra muestra en ningún momento.

(5).

5. SOLUCIÓN SALINA

- a. La solución salina debe ser preparada adicionando cinco partes de cloruro de sodio en noventa y cinco partes de agua. El tipo de sal a ser utilizada debe contener un máximo de 0.3 % de impurezas totales en masa; un máximo de 0.1 % de haluros, exceptuando el caso del cloruro; y un contenido de cobre menor a 0.3 partes por millón.
- b. El pH de la solución salina debe poseer un valor tal que, al momento de ser atomizado a 35° C, la solución recolectada, debe situarse dentro de un rango de pH entre 6.5 y 7.2. Resaltando que, previo a ser atomizada, la solución debe estar libre de sólidos suspendidos.

(5).

6. ABASTECIMIENTO DE AIRE

- a. El aire comprimido que será suministrado a la torre de saturación de aire deberá estar libre de toda impureza sólida o líquida, previo a su circulación a través de los filtros del equipo.

b. El suministro de aire comprimido hacia la boquilla o boquillas aspersoras deberá estar condicionado mediante su introducción en la parte inferior de la torre, previamente repleta con agua.

c. De manera cuidadosa se debe prestar atención a la relación existente entre la temperatura y la presión que se presenten dentro de la torre, ya que de ésta dependerá el grado de homogeneidad y reproducibilidad de la prueba salina.

(5).

Tabla No. 1. Presiones y temperaturas sugeridas para la torre de saturación de aire en prueba B117

Presión de aire (kPa)	Temperatura (° C)
83	46
96	47
110	48
124	49

(5).

7. CONDICIONES INTERNAS DE LA CÁMARA SALINA DURANTE LA PRUEBA B117

a. Temperatura. La zona de exposición para la prueba dentro de la cámara debe mantenerse dentro del rango de 33.9° C – 36.7° C.

b. Atomización y cuantificación de niebla. Se deben colocar al menos dos probetas recolectoras de niebla condensada por cada boquilla de atomización, sin que esto interfiera con la niebla que se esté condensando sobre las muestras sometidas a la prueba.

c. Las boquillas de atomización deben estar dirigidas de forma que la descarga de niebla no se realice directamente sobre ninguna de las muestras expuestas. (5).

G. DETERMINACIÓN DE DEPOSICIÓN DE PASIVANTE EN LÁMINA

1. Materiales a utilizar

- 1 beaker de 250 mL
- 1 balón aforado de 50 mL
- 1 probeta de 25 mL

2. Reactivos

- Solución de ácido clorhídrico (HCL) al 1:1

3. Procedimiento a seguir

- a. Preparar una alícuota de 25 mL de la solución de HCL, vertiéndola dentro del beaker, para luego agregar la muestra de acero galvanizado que se desee analizar, esperando hasta que ésta se disuelva completamente, alcanzando un color gris opaco sobre su superficie.
- b. Transferir la solución contenida en el beaker hacia el balón aforado, luego diluir con agua desmineralizada y aforar utilizando una pizeta para lograr mayor exactitud.
- c. Realizar la lectura de la concentración de Cromo en partes por millón, por medio de espectrofotometría de absorción atómica.

(11).

III. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la producción de acero galvanizado a nivel mundial ha venido presentando un desarrollo de manera sorprendente. Y es que, desde las épocas de la revolución industrial, el acero pasó a formar parte de la vida de un 90 % de las industrias; desde la construcción de puentes gigantescos que conectan ciudades divididas por ríos, hasta la fabricación de vehículos automotores de combustión interna, los cuales pasaron de ser un mero bien suntuoso, hasta convertirse en un medio básico de locomoción diaria. Todo esto debido al crecimiento tan acelerado que ha sufrido la industria y el comercio de forma global, lo cual ha provocado una mayor demanda del tiempo real de trabajo de todos los individuos que conforman la sociedad productiva, directa o indirectamente.

Todo este auge industrial, ha venido a provocar que Guatemala no sea la excepción, ya que el crecimiento industrial se ha desarrollado notablemente, no sólo dentro de la industria del acero, sino que también dentro de todo el resto de industrias que permiten poseer un desarrollo económico sostenible, a medida que más y más empresas, tanto a nivel nacional como internacional, han decidido invertir en Guatemala. Todo lo cual, ha venido a colocarse como parte de ese gran compromiso que se tiene de lograr el desarrollo de la industria nacional para poder algún día competir con las grandes industrias a nivel mundial.

Sin embargo, esta visión de compromiso y desarrollo industrial, no sería posible, si no se fueran creando las estrategias y características necesarias, que permitan que los procesos industriales a nivel nacional sean cada vez más competitivos, manteniendo un costo de fabricación estable, mediante el desarrollo de proyectos de aplicación real, los cuales permitan mejorar el grado de aprovechamiento de todos los

recursos con los que se cuenta dentro de las empresas. Y es precisamente por ello, que una mejora considerable en el aprovechamiento de una materia prima vital para el proceso de galvanizado, como es el pasivante, vendría a traducirse en una mejora considerable en la generación de utilidades brutas, lo cual se reflejaría en un crecimiento industrial que, a su vez, generaría más y mejores fuentes de trabajo dentro de una industria tan indispensable para el desarrollo de nuestro país, como lo es la industria del acero galvanizado.

IV. OBJETIVOS

A GENERAL

- Mejorar el aprovechamiento de la cantidad de pasivante, utilizado como solución protectora del galvanizado contra la formación de óxido blanco, mediante la aplicación de análisis cuantitativos sobre muestras sometidas a una prueba de corrosión acelerada.

B ESPECÍFICOS

- Someter un conjunto de treinta muestras de acero galvanizado de diferentes espesores a una prueba de oxidación acelerada dentro de una cámara salina, durante un período determinado de tiempo, bajo condiciones ambientales predeterminadas.
- Realizar análisis cuantitativos sobre las treinta muestras sometidas a la prueba de salinidad con la finalidad de determinar el grado de oxidación que sufrió cada una, lo cual funcionará como indicador del grado de efectividad que está brindando la cantidad de pasivante utilizado con cada espesor analizado.
- Utilizar los resultados obtenidos de los análisis realizados, como punto de partida para la determinación de una concentración ideal de pasivante para cada tipo de material.
- Determinar cuál es el grado de aprovechamiento actual del pasivante, de acuerdo a las concentraciones ideales obtenidas, con la finalidad de reducir las concentraciones actuales de proceso que se encuentren por encima de estos valores ideales, y con ello percibir un beneficio de ahorro real para el proceso.

V. PROBLEMA A RESOLVER

Actualmente, las industrias galvanizadoras que operan en Guatemala, no cuentan con un procedimiento específico enfocado en el aprovechamiento al máximo de las materias primas que son utilizadas como aditivos protectores de la capa de galvanizado. Tal es el caso de la solución pasivante.

VI. METODOLOGÍA

A. Marco teórico

Se realizó una búsqueda completa de la literatura existente, a cerca de los diferentes tópicos concernientes directamente con el tema central del trabajo de graduación. Abarcando los siguientes temas:

1. Proceso de galvanizado
2. Óxido blanco
3. Pasivante
4. Pruebas de corrosión acelerada
5. Cámara salina

B. Desarrollo experimental

Para llevar a cabo el desarrollo experimental del proyecto se tomó como punto de partida la utilización del equipo y de las muestras de acero galvanizado proporcionadas por una de las empresas galvanizadoras más importantes que operan en Guatemala. Siguiendo el siguiente esquema de etapas y actividades:

1. Se seleccionó al azar una población de 30 muestras de acero galvanizado, distribuidas en seis grupos iguales, tomando en cuenta los seis espesores más comerciales de la industria del acero en Guatemala, de acuerdo a:

Tabla No. 2. Distribución de muestras seleccionadas

Cantidad de muestras	Espesor base (mm)	Capa de zinc (kg/m ²)
5	0.15	0.12
5	0.29	0.13
5	0.32	0.18
5	0.36	0.18
5	0.43	0.18
5	0.70	0.22

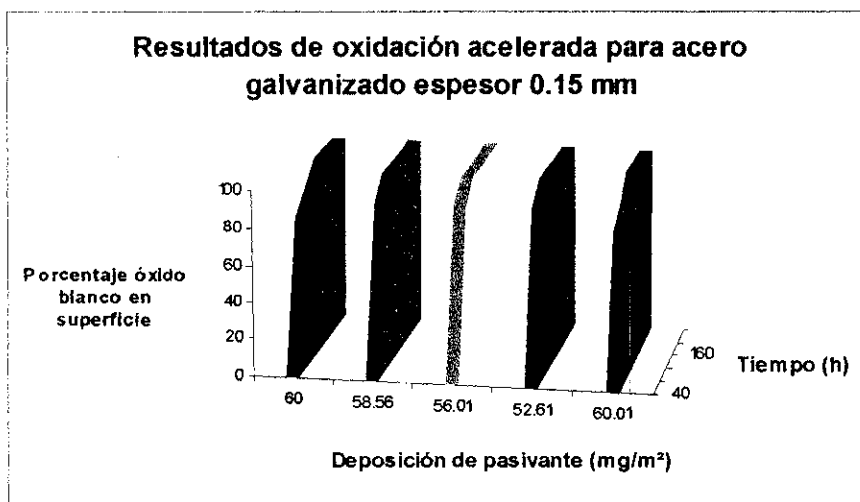
2. Se realizó un análisis espectrofotométrico de absorción atómica a dichas muestras, con la finalidad de cuantificar la presencia de cromo en cada una de ellas, como precedente para los análisis posteriores (Ver procedimiento en Antecedentes).
3. Se sometieron todas las muestras, al mismo tiempo, a una prueba de corrosión acelerada dentro de una cámara salina. Dicha prueba tendrá una duración total de 240 horas, y sus condiciones de operación (temperatura, presión, concentración salina del medio) serán regidas de acuerdo a las especificaciones preestablecidas para la prueba B117 en cámaras salinas (ver antecedentes, pág. 7), avalada según normas ASTM.
4. Se realizaron mediciones cualitativas y cuantitativas, aproximadamente cada 40 horas, a cerca del grado de oxidación que irá sufriendo cada grupo de muestras a lo largo de la prueba. Utilizando para el análisis cuantitativo un sondeo matemático de la cantidad total de superficie dañada con óxido respecto a la superficie total de cada muestra.
5. Finalmente, se analizaron los resultados obtenidos; se halló la concentración idónea de pasivante para cada tipo de espesor analizado; y se determinó el grado de aprovechamiento que se estaba teniendo de dicho pasivante, para cada una de las muestras. Mejorando con esto, el aprovechamiento de las muestras en las cuales se estaba utilizando una cantidad mayor de pasivante de la necesaria, hasta obtener un dato cuantitativo o estimación del ahorro neto que proporcionó dicha mejora en el aprovechamiento de esta materia prima (pasivante).

VII. RESULTADOS

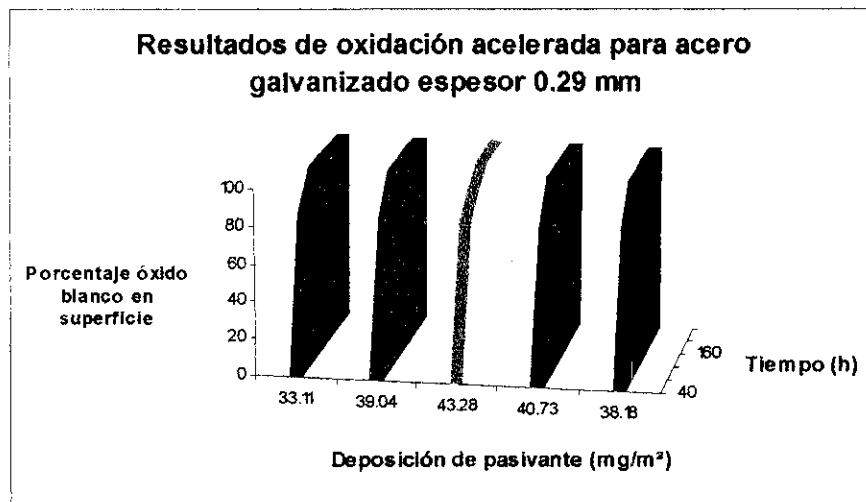
Tabla No. 3.

Resultados obtenidos sobre muestras analizadas									
No. de muestra	Espesor (mm)	Deposición real de pasivante (mg/m ²)	Deposición media	Tiempo (h)					
				40	80	120	160	200	240
				porcentaje de óxido blanco hallado sobre superficie de muestras					
1	0.15	60	57.44	0	80	90	100	100	100
2		58.56		0	90	100	100	100	100
3		56.01		0	90	100	100	100	100
4		52.61		0	90	100	100	100	100
5		60.01		0	80	90	100	100	100
6	0.29	33.11	38.87	0	80	100	100	100	100
7		39.04		0	80	100	100	100	100
8		43.28		0	80	90	100	100	100
9		40.73		0	80	100	100	100	100
10		38.18		0	80	100	100	100	100
11	0.32	44.97	41.41	0	5	20	30	100	100
12		34.8		0	5	40	50	100	100
13		38.19		0	5	30	40	100	100
14		48.37		0	5	20	30	100	100
15		40.73		0	5	40	50	100	100
16	0.36	33.95	40.28	0	5	80	90	100	100
17		43.28		0	5	40	50	100	100
18		46.67		0	5	40	50	100	100
19		38.19		0	5	80	90	100	100
20		39.2		0	5	80	50	100	100
21	0.43	43.28	39.19	5	80	90	100	100	100
22		40.88		5	80	90	100	100	100
23		31.4		5	80	90	100	100	100
24		39.88		5	80	90	100	100	100
25		40.73		5	80	90	100	100	100
26	0.7	40.73	40.57	5	70	90	100	100	100
27		40.4		5	70	90	100	100	100
28		40.38		5	70	90	100	100	100
29		40.65		5	70	90	100	100	100
30		40.71		5	70	90	100	100	100

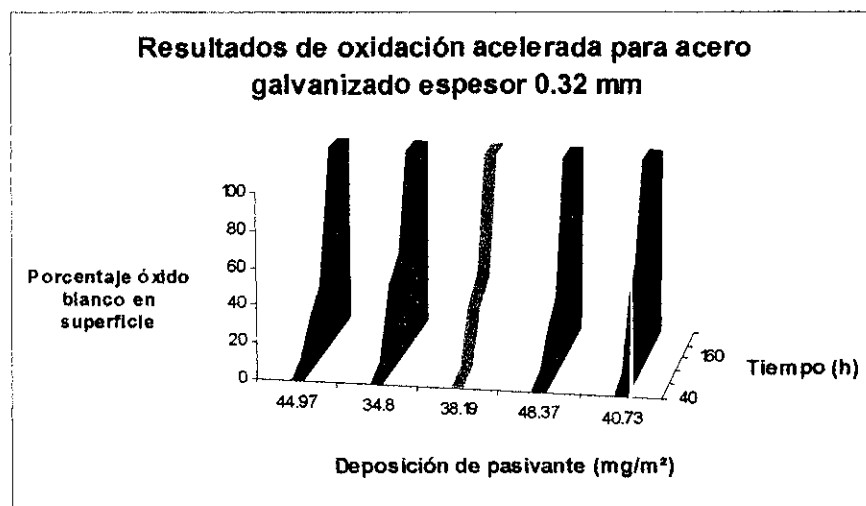
Gráfica No. 1.



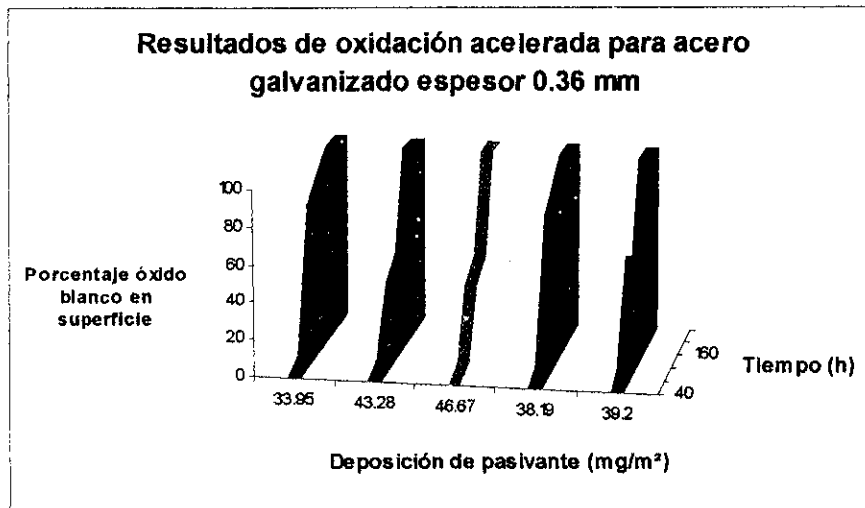
Gráfica No. 2.



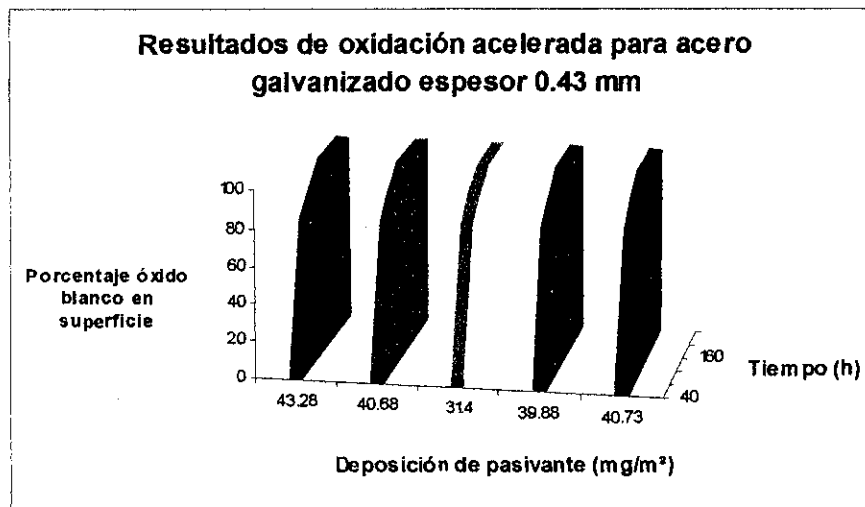
Gráfica No. 3.



Gráfica No. 4.



Gráfica No. 5.



Gráfica No. 6.

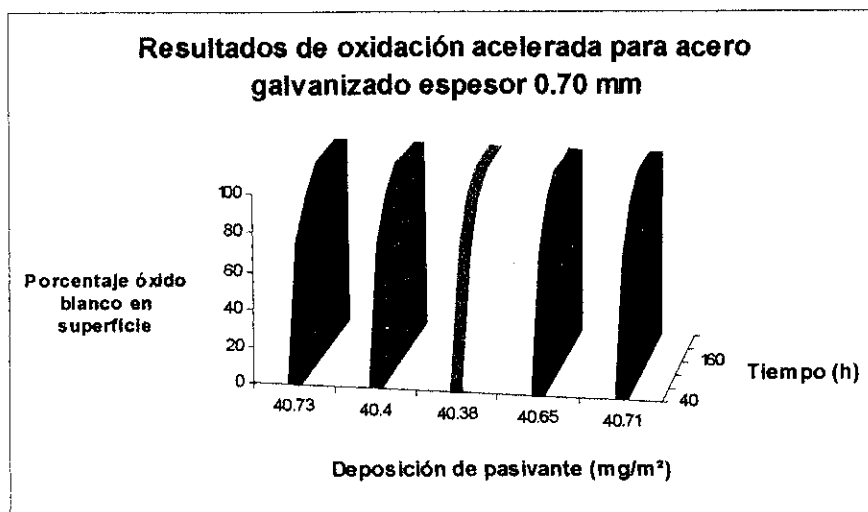


Tabla No. 4.

Resultados obtenidos sobre muestras con especificaciones corregidas*								
		Tempo (h)	40	80	120	160	200	240
No. de muestra	Espesor (mm)	Deposición real de pasivante (mg/m ²)	Porcentaje de óxido blanco hallado sobre superficie de muestras					
A	0.32	34.41	0	80	100	100	100	100
B	0.32	34.43	0	80	100	100	100	100
C	0.36	35.42	0	80	90	100	100	100
D	0.36	35.38	0	80	90	100	100	100

Tabla No. 5.

Resultados finales del ahorro percibido luego de mejorar el aprovechamiento de pasivante utilizado						
Espesor base de acero (mm)	Concentración media inicial de pasivante (%v/v)	Concentración media corregida de pasivante (%v/v)	Porcentaje de ahorro percibido	Ahorro en peso de pasivante (kg)	Ahorro unitario en costos de pasivante (Q)	Estimación final de ahorro (Q)
0.32	14.8	12.3	16.89%	0.00285	0.113	56,500
0.36	14.18	12.47	12.06%	0.00195	0.077	38,500

* Basada en una producción anual de 2500 millones de kilos por cada espesor considerado

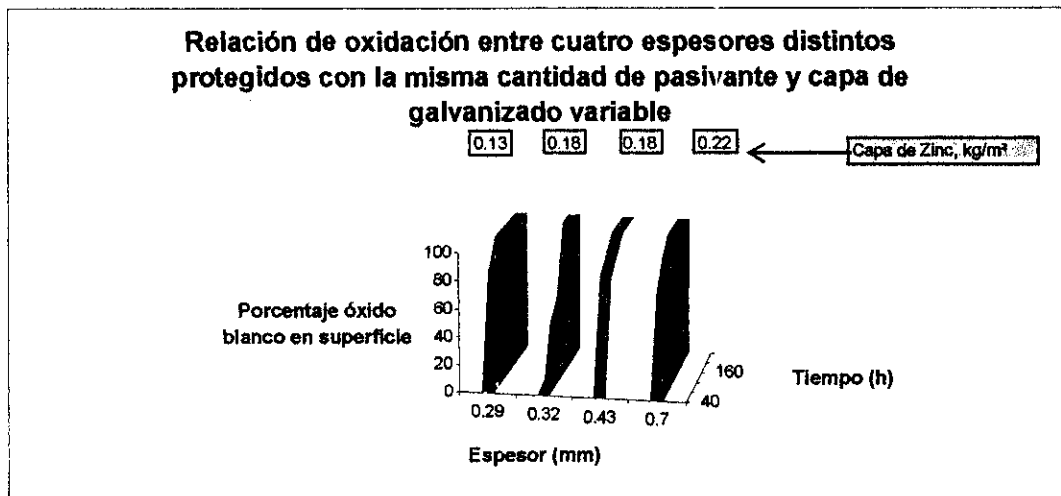
VIII. DISCUSIÓN

De los resultados obtenidos sobre las muestras de acero analizadas se observaron varias situaciones importantes. En primer lugar, se observó que los espesores milimétricos 0.29, 0.32, 0.36, 0.43 y 0.70 sí cumplen con los estándares de calidad predeterminados por la empresa productora, en lo referente al tiempo nominal estipulado para su vida útil (Ver anexos, pág. 41). Ya que, de acuerdo a estos estándares, cualquier tipo de material (léase cualquier combinación de espesor + capa de galvanizado + pasivante aplicado) debería ser capaz de presentar una cantidad menor o igual al 80 % de óxido blanco sobre su superficie luego de transcurridas 80 horas bajo las condiciones de salinidad reproducidas a lo largo de la prueba B117, utilizada para la experimentación realizada. Sin embargo, las muestras de espesores 0.32 y 0.36 presentan dicha resistencia a la oxidación del zinc incluso luego de transcurridas más de 160 horas bajo dichas condiciones de corrosión. Lo cual significa que la durabilidad de estos dos tipos de materiales es excelente desde el punto de vista del cliente que adquirirá el producto pero, esta durabilidad “extra” representa una pérdida directa, aún no percibida, para y por la empresa, respectivamente, ya que, prácticamente se está desperdiciando materia prima indirecta, al utilizar una cantidad mayor de pasivante de la que realmente se debería de utilizar para lograr obtener la durabilidad y resistencia a la corrosión deseada, de acuerdo a los estándares de calidad preestablecidos en este sentido.

Por otro lado, se observó que dentro de todas las muestras analizadas, en aquellas que poseen una misma cantidad de pasivante depositado sobre su superficie,

pero que presentan capas de galvanizado distintas entre sí, tiende a ser más marcada la oxidación en las que poseen menor capa de galvanizado (Ver gráfica No. 7). Esto lógicamente se debe a que entre más gruesa sea la pared o superficie de galvanizado que rodea al acero, mayor será la resistencia a la oxidación debido a la mayor concentración y compactación del zinc, o sea que, por un lado habrá mucho más sustrato (zinc) para la reacción de oxidación, lo cual prolongará el tiempo total de la misma y, a su vez, las fuerzas electrostáticas entre moléculas de zinc serán mucho mayores cuanto más cercanas o compactas se encuentren unas con otras, que es lo que precisamente sucede en las muestras con mayor capa de galvanizado.

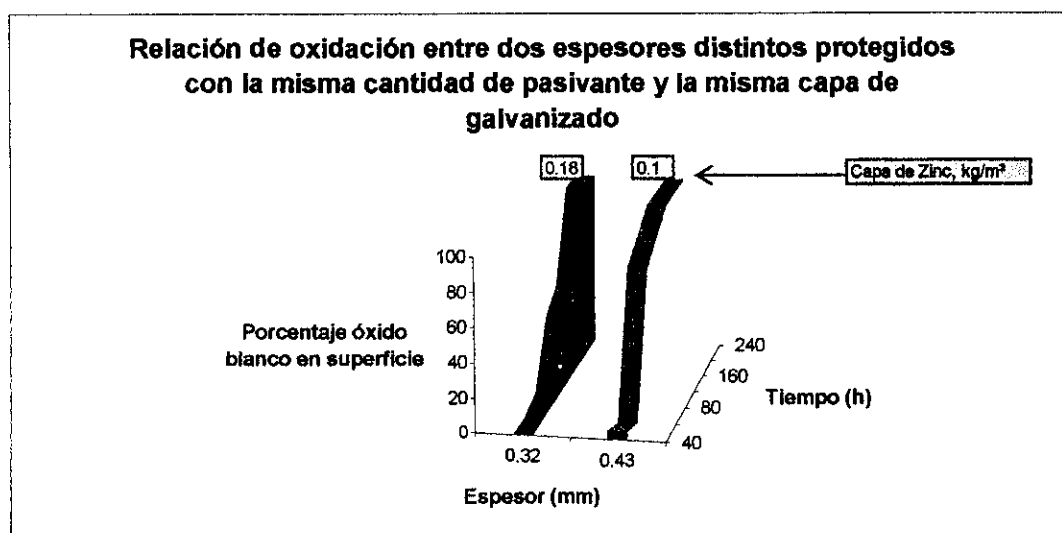
Gráfica No. 7.



Así mismo, se observó que dentro del grupo de muestras con el mismo grado de deposición de pasivante, existe un subconjunto de muestras que, a su vez, poseen la misma capa de galvanizado, y en las cuales, la tendencia a la oxidación se encontró más marcada en aquellas muestras con espesores de acero más gruesos (Ver gráfica No. 8, pág. 33). Situación que se presenta debido a que entre más delgado sea el espesor base

del acero galvanizado, para una misma capa de zinc, mayor será la concentración existente de este mineral en los extremos de la lámina, ya que, se está distribuyendo una misma cantidad o densidad superficial de zinc dentro de una menor área superficial de acero.

Gráfica No. 8.



Finalmente, se observó cómo luego de corregir las concentraciones iniciales de pasivante de las muestras que presentaron un tiempo de resistencia a la corrosión mayor al tiempo deseado (espesores 0.32 mm y 0.36 mm) de acuerdo a los estándares de calidad predeterminados, se obtuvo un tiempo de durabilidad que cumpliera con dichos estándares de calidad, y a su vez, se ahorró aproximadamente 0.002 kg de pasivante por espesor, lo cual se tradujo en un ahorro neto por bobina de acero (masa promedio = 5000 kg) de 0.113 y 0.077 quetzales para las muestras de 0.32 mm y 0.36 mm, respectivamente. Cumpliendo con ello con el objetivo planteado, al lograr mejorar significativamente el aprovechamiento del pasivante utilizado para el proceso de galvanizado de las muestras de acero consideradas a lo largo de la experimentación.

IX. CONCLUSIONES

1. El ahorro cuantitativo medio percibido a raíz de la mejora en el aprovechamiento del pasivante fue de 0.002 kg por cada espesor considerado.
2. El ahorro económico neto de pasivante fue de Q 0.113 por bobina de acero galvanizado con espesor base 0.32 mm; y de Q 0.077 por bobina de acero con espesor base 0.36 mm.
3. La concentración ideal de pasivante de la solución original fue de 12.3% (v/v) para acero con espesor base 0.32 mm; y de 12.47% (v/v) para acero con espesor base 0.36 mm.
4. Todas las muestras analizadas presentaron un porcentaje de óxido blanco sobre su superficie del 80 % después de ser sometidas a la prueba B117 para cámaras salinas, cumpliendo con los estándares de calidad predeterminados por la empresa sujeta al estudio.

X. RECOMENDACIONES

1. Se sugiere realizar la prueba de corrosión acelerada (B117) a cada tipo distinto de material (léase cualquier combinación de espesor + capa de galvanizado + pasivante aplicado) que se desee procesar en cantidades industriales, ya que esto asegurará el buen aprovechamiento del pasivante y otras materias primas involucradas dentro del proceso.
2. Se sugiere realizar este estudio de medición del aprovechamiento del pasivante por cada lote que se desee procesar, con la finalidad de asegurar la consistencia en el ahorro de materias primas como ésta.

XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Anderson, D.; Sweeney, D. y Williams, T. 1999. *Estadística para administración y economía*. Séptima edición. Thomson Editores.
2. Asociación Americana de Galvanizadores. 1989. *Hot dip galvanizing for corrosion protection of steel products*. Revista de la Asociación Americana de Galvanizadores. II: 33.
3. ASTM Internacional. 1995. *Simposio sobre corrosión de metales no ferrosos*. Manual de corrosión H.H Uhlig. (175): 120-125.
4. ASTM Internacional. 2004. *Manual de operación practica para una camara de niebla salina* [Estados Unidos]. Manual de ASTM para cámaras salinas. B117 (03).
5. Bigos, J. 1990. *Surface preparation of steels for organic and other protective coatings*. Manual de pintura de estructuras de acero. I, II (TP-6G): 9, 173.
6. Copson, H. 1997. *Diseño e interpretación de ensayos sobre corrosión atmosférica*. 22-35.
7. Harvey Peter. 1995. *Evaluation of galvanic corrosion*. Boletín del Naval Ship. I(1): 123.

8. Johnson, K.; Mihelic, J. 1991. *Update on white rust corrosion control*. Boletín del Instituto de torres de enfriamiento. TP91 (14).

9. Kobrin, G. *Selecting materials to avoid or minimize corrosion*. Dupont de Nemours & compañía limitada.

10. Konecny, Robert. 1970. *Surface passivation of galvanized coatings by quenched chromating*. Corporación de minerales San José.

11. Kunz R.; Hines D. 1990. *Corrosion of zinc in cooling water*. Boletín de la Asociación Americana de Galvanizadores. 3 (48).

12. Seteven Louis. *Forms of corrosion*. Boletín del Naval Ship. II (1): 132.

XII. ANEXOS

A. DATOS ORIGINALES

Tabla No. 6.

Distribución de muestras de acero galvanizado analizadas				
No. de muestra	Espesor base de acero (mm)	Capa de Zinc (kg/m ²)	Concentración de pasivante (g/l)	Comp. J/dif
1	0.15	0.12	10	11.6
2	0.15	0.12	13.2	
3	0.15	0.12	11.6	
4	0.15	0.12	11.6	
5	0.15	0.12	11.6	
6	0.29	0.13	11.4	12.18
7	0.29	0.13	10.1	
8	0.29	0.13	13.4	
9	0.29	0.13	11.9	
10	0.29	0.13	14.1	
11	0.32	0.18	15.6	14.8
12	0.32	0.18	13.8	
13	0.32	0.18	15	
14	0.32	0.18	14.8	
15	0.32	0.18	14.8	
16	0.36	0.18	13.1	14.18
17	0.36	0.18	14.8	
18	0.36	0.18	14.6	
19	0.36	0.18	14.2	
20	0.36	0.18	14.2	
21	0.43	0.18	14.2	14.62
22	0.43	0.18	15.1	
23	0.43	0.18	14.6	
24	0.43	0.18	14.6	
25	0.43	0.18	14.6	
26	0.7	0.22	15	15.04
27	0.7	0.22	15.1	
28	0.7	0.22	15	
29	0.7	0.22	15	
30	0.7	0.22	15.1	

B. DATOS DE PROCESO

Tabla No. 7.

Especificaciones corregidas para espesores donde se desea mejorar el aprovechamiento de pasivante			
No. de muestra	Espesor base de acero (mm)	Capa de zinc (kg/m ²)	Concentración de pasivante (%v/v)
A	0.32	0.18	12.3
B	0.32	0.18	12.3
C	0.36	0.18	12.47
D	0.36	0.18	12.47

C. CÁLCULO DE MUESTRA

- Se realizó una corrida de datos correspondiente a la justificación estadística del número total y de la distribución de muestras escogidos para la experimentación realizada, basándose en un nivel de precisión, B, de un tercio de desviación estándar ($\sigma/3$), el cual aseguraría un grado de confiabilidad de los resultados obtenidos del 95%. A continuación se muestran los cálculos pertinentes:
 - Se obtuvo la desviación estándar, σ , correspondiente a cada espesor considerado, basándose en una producción semanal de 168 lotes, distribuidos equitativamente por espesor (28 lotes c/espesor = N_i); considerando a su vez, una tolerancia en el espesor de las muestras escogidas de ± 0.01 mm (de acuerdo a estándares propios de la empresa estudiada), con:

$$\sigma \equiv \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (X_i - X)^2}{N - 1}}$$

(12)

En donde, $\Sigma (X_i - X)^2 = (\text{espesores considerados} = 6)(X \pm 0.01 - X)^2$, dado que el espesor para cada muestra puede variar únicamente en una magnitud igual a la tolerancia descrita.

Obteniendo la siguiente igualdad:

$$\sigma = [(6 (X \pm 0.01 - X)^2)/(N-1)]^{1/2}$$

donde, $X =$ media del espesor considerado.

$N =$ población total de muestras a considerar

De donde, para este caso en particular, se partió de una población total por semana, $N = 168$ muestras. Ejemplificándose, a continuación, el caso para el espesor 0.15 mm:

$$\sigma = [(6)(0.15 \text{ mm} \pm 0.01 \text{ mm} - 0.15 \text{ mm})^2 / 167]^{1/2} = 0.001895.$$

Obteniendo una precisión $B = \sigma/3 = (0.00019 / 3) = 0.0006$

Valor que se introdujo en la siguiente fórmula con la finalidad de hallar la cantidad de muestras (n) que brindarían la confiabilidad deseada,

$$n \equiv \frac{\left(\sum_{i=1}^6 N_i \sigma \right)^2}{N^2 \left(\frac{B^2}{4} \right) + \left(\sum_{i=1}^6 N_i \sigma^2 \right)} \quad (12)$$

Obteniendo,

$$n = [(6)(28)(0.001895)]^2 / [(168)^2(0.0006)^2/4 + (6)(28)(0.001895)^2] = 32.25$$

≈ 30 muestras

- Así mismo, se determinó estadísticamente la distribución de las 30 muestras analizadas (n_i) a partir de la siguiente fórmula:

$$n_i \equiv n \left(\frac{N_i \sigma}{\sum_{i=1}^6 N_i \sigma} \right)$$

de donde, $n_i = 30 [(28)(0.001895) / (6)(28)(0.001895)] = 6$ muestras por espesor.

- Se realizó una corrida de datos correspondiente a la determinación del ahorro unitario en costos de pasivante (AUP), considerando para ello que dicho ahorro unitario se da por bobina galvanizada para cada espesor. Es decir, por ejemplo, que la magnitud en ahorro que se halló para el espesor 0.32 corresponde al ahorro neto que se obtiene por cada bobina galvanizada de dicho espesor. A continuación se ejemplifican los cálculos pertinentes:

AUP = (Volumen de pasivante al inicio, mL - Volumen de pasivante mejorado, mL) (Densidad pasivante en g/mL) (1 kg/1000 g)(39.65 quetzales/1 kg) = (14.8 mL - 12.3 mL) (1.14 g/mL) (1 kg/1000 g) (Q 39.65/1 kg) = **Q 0.113**.

- Se realizó una corrida de datos correspondiente a la estimación anual de ahorro (EAA), para lo cual se basó en una producción anual de 2500 millones de kilos por cada espesor considerado, asumiendo un peso medio de 5,000

kilos por bobina. A continuación se ejemplifican los cálculos para el espesor 0.32mm:

$$EAA = (2500,000,000 \text{ kg}) (1 \text{ bobina}/5,000 \text{ kg}) (Q 0.113/1 \text{ bobina}) = Q 56,500.$$

- Se realizó una corrida de datos correspondiente a la determinación del porcentaje de ahorro percibido a raíz de la mejora en el aprovechamiento del pasivante. A continuación se ejemplifican los cálculos correspondientes al espesor 0.32mm:

$$\begin{aligned} \text{Porcentaje de Ahorro} &= [(\text{Conc. Media inicial de pasivante, \% v/v} - \text{Conc.} \\ &\text{media corregida de pasivante, \% v/v}) / \text{Conc. Media inicial}] \times 100\% \\ &= [(14.8 \% - 12.3 \%) / 14.8 \%] \times 100 \% = \mathbf{16.89 \%} \end{aligned}$$

D. GLOSARIO DE TÉRMINOS E INFORMACIÓN IMPORTANTE

- **Vida útil:** Tiempo necesario para que una lámina de cualquier tamaño y forma sufra una oxidación del zinc del 80 % sobre su superficie. Dicha oxidación se presenta como un polvo blanquecino y se le denomina óxido blanco.
- **Materia prima directa:** Material que conforma parte inmediata del producto final manufacturado y por ende interviene de manera directa dentro del proceso.
- **Precio actual específico del pasivante:** Q 39.65 por kilogramo, equivalente a unos US\$ 5.051 por kilogramo.
- **Densidad media del pasivante:** 1.14 g/mL.