

/03/

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LA CAPA DE ZINC SOBRE ACERO AL VARIAR CALIDAD SUPERFICIAL Y VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO

MECHANICAL BEHAVIOR OF THE ZINC LAYER ON STEEL WHEN VARYING SUPERFICIAL QUALITY AND COOLING SPEED

Juan Chico Chamorro

Ingeniero Mecánico por la Escuela Politécnica Nacional. Quito.(Ecuador).

E-mail: juan.chico@epn.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4287-8447>

Carlos Díaz Campoverde

Ing. Mecánico, Máster en Ciencias por la Escuela Politécnica Nacional, Docente, Jefe de Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla del Departamento de Materiales de la Escuela Politécnica Nacional. Quito. (Ecuador).

E-mail: carlos.diaz@epn.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6978-3638>

Patricia Proaño Sánchez

Ingeniera Mecánica, Departamento de Materiales, Escuela Politécnica Nacional. Quito. (Ecuador).

E-mail: patricia.proanio@epn.edu.ec ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6217-9059>

Recepción: 06/06/2018. Aceptación: 17/10/2018. Publicación: 14/12/2018

Citación sugerida:

Chico Chamorro, J., Díaz Campoverde, C. y Proaño Sánchez, P. (2018). Comportamiento mecánico de la capa de zinc sobre acero al variar calidad superficial y velocidad de enfriamiento. 3CTecnología. Investigación y pensamiento crítico. doi:<http://dx.doi.org/10.17993/3ctecno.2018.v7n4e28.48-69/>

RESUMEN

La corrosión del acero estructural es un problema recurrente en el Ecuador, llegando a afectar a muchas edificaciones, y la forma en que se aplica el revestimiento protector de zinc es la principal causa. El presente estudio analiza el comportamiento mecánico adhesivo de la capa protectora depositada sobre acero estructural, variando la calidad superficial y la velocidad de enfriamiento del recubrimiento. La metodología aplicada consiste en caracterizar la materia prima (perfiles estructurales de tipo angular), aplicar pretratamientos superficiales a los perfiles angulares mediante pulido, lijado, esmerilado y como viene de fábrica, galvanizar los perfiles angulares en las empresas A y B, medir la capa de galvanizado, identificar y medir el espesor de las fases, medir rugosidad superficial, cuantificar durezas de la fase zeta, y finalmente, medir la adhesividad del recubrimiento al sustrato. De los resultados obtenidos se desprende que la rugosidad permite un mejor anclaje de la capa de zinc a la superficie metálica, las altas velocidades de enfriamiento permiten obtener una capa de zinc con más brillo, mayor dureza y adherencia, aunque sacrifica la ductilidad de la capa de recubrimiento al tener un comportamiento más frágil. La presencia de defectos en las fases formadas por el zinc influye en el comportamiento mecánico durante el ensayo de pull-off, ya que puede llegar a romper el sustrato al momento de desprenderse de la superficie del acero. Los elevados espesores de la capa de zinc confieren al acero una mayor vida útil y resistencia a la corrosión. Los datos obtenidos en este estudio sirven para corregir o mejorar la forma de aplicación de este recubrimiento.

ABSTRACT

The corrosion of structural steel is a recurrent problem in Ecuador, affecting many buildings, and the way in which the zinc protective coating is applied is the main cause. The present study analyzes the adhesive mechanical behavior of the protective layer deposited on structural steel, varying the surface quality and cooling rate of the coating. The applied methodology consists of characterizing the raw material (structural profiles of angular type), applying surface pre-treatments to the angular profiles by polishing, sanding, grinding and as it comes from the factory, galvanizing the angular profiles in companies A and B, measuring the layer of galvanizing, identify and measure the thickness of the phases, measure surface roughness, quantify hardness of the zeta phase, and finally, measure the adhesiveness of the coating to the substrate. From the results obtained it can be seen that the roughness allows a better anchorage of the zinc layer to the metallic surface, the high cooling speeds allow to obtain a zinc layer with more brightness, greater hardness and adherence, although it sacrifices the ductility of the coating layer when having a more fragile behavior. The

presence of defects in the phases formed by the zinc influence the mechanical behavior during the pull-off test, since it can break the substrate when it is released from the steel surface. The high thicknesses of the zinc layer give the steel a longer life and resistance to corrosion. The data obtained in this study serve to correct or improve the application form of this coating.

PALABRAS CLAVE

Adherencia, Difusión, Aleación Fe-Zn, Galvanizado por inmersión en caliente, Recubrimiento de zinc.

KEY WORDS

Adhesion, Diffusion, Fe-Zn alloy, Hot-dip galvanizing, Zinc coating.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales metálicos en ambientes húmedos sufren un proceso de corrosión espontáneo no deseado que es causado por las acciones químicas o físico-químicas del ambiente. Esta corrosión destruye gradualmente los metales y lo transforma irreversiblemente hasta que vuelvan a su estado mineral (Kuklik y Kudlacek, 2016). Por esta razón, las superficies se protegen de los agentes corrosivos a través de los denominados métodos activos y pasivos, siendo los más destacados los procedimientos pasivos y dentro de estos, los recubrimientos metálicos (Maaß, 2011).

Por lo tanto, el zinc (Zn) se convierte en una buena opción para brindarle al acero una adecuada protección anticorrosiva. Esta protección es de naturaleza catódica, de modo que el zinc adquiere el papel de ánodo de sacrificio, y además, le confiere inmunidad al hierro. Igualmente, sobre esta capa protectora se crea una barrera de alta resistencia y adherencia llamada pátina, la cual desacelera el proceso corrosivo. Por esta razón, para promover la calidad del recubrimiento de zinc se han desarrollado diversas tecnologías como chapado metálico, galvanoplastia, rociado térmico, sherardizado y galvanizado por inmersión en caliente (Kuklik y Kudlacek, 2016).

En consecuencia, se considera que el galvanizado por inmersión en caliente es uno de los métodos más convenientes y útiles como protección. Para ello, se requiere sumergir el sustrato de acero en una tina de zinc fundido con el fin de crear un recubrimiento aleado, donde intervienen procesos de difusión, reacciones metalúrgicas y transformaciones termodinámicas (Kuklik y Kudlacek, 2016). Estas superficies galvanizadas no muestran apariencias con composición homogéneas, pues las reacciones no ocurren al mismo tiempo, se originan en zonas localizadas y dependen de ciertas diferencias estructurales, de la humedad y de la presencia de partículas extrañas (Van Eijnsbergen, 2012).

Para generar menor contaminación y menor demanda energética se emplean más comúnmente temperaturas entre 440-460°C, donde el recubrimiento adherido firmemente al hierro normalmente presenta las siguientes fases: la fase gamma (γ), la fase delta (δ), la fase zeta (ζ), y la fase eta (η).

Asimismo, dentro de este método de protección, se tiene que un nodo de los procesos empleados para este fin es el galvanizado discontinuo por lotes, donde los sustratos metálicos son tratados individualmente y sus superficies se limpian y se activan al atravesar varias etapas previas a la inmersión en la tina de zinc fundido, estas etapas son: desengrasado, lavado, decapado, enjuague, fluxado y secado. Por otra parte, el recubrimiento se produce a causa de la difusión entre átomos de hierro y zinc, la cual

así vez genera enlaces intermetálicos y promueve la formación de ciertas fases a temperaturas de entre 435-620°C. No obstante, para generar menor contaminación y menor demanda energética se emplean más comúnmente temperaturas entre 440-460°C, donde el recubrimiento adherido firmemente al hierro normalmente presenta las siguientes fases: la fase gamma (γ) que es difícil de observar, la fase delta (δ) que posee un gran espesor, la fase zeta (ζ) donde los cristales se disuelven y flotan permanentemente, y la fase eta (η) que es completamente zinc (Maaß, 2011).

Entre 440-460°C, la estructura de las fases hierro-zinc depende fuertemente de los diferentes parámetros de galvanizado. Así también, estos productos tienen que cumplir con sus respectivos estándares de calidad, para lo cual es necesario considerar los factores que influyen sobre las propiedades y espesor del recubrimiento, tales como el contenido de silicio en el acero, los tratamientos mecánicos superficiales del sustrato, la temperatura y los tiempos de inmersión en la tina de zinc fundido, las velocidades de enfriamiento, entre otros (Kuklik y Kudlacek, 2016).

En el presente estudio se busca establecer la relación existente entre la calidad superficial del sustrato y el espesor de la capa de galvanizado obtenido, así como también la influencia que ejercen la calidad superficial y temperatura de enfriamiento sobre el grado de adhesión y difusión del sistema cuando se expone el recubrimiento a determinados esfuerzos mecánicos. La información obtenida beneficiará al sector industrial y artesanal dedicado al recubrimiento de aceros estructurales en el Ecuador, ya que ayudará a mejorar o corregir métodos de aplicación de la capa de galvanizado, con la consecuente mejora en calidad, adherencia, resistencia a la abrasión, corrosión y una mayor vida útil de estos recubrimientos.

2. METODOLOGÍA

Para la investigación se emplean perfiles de acero de bajo contenido de carbono, con dimensiones AL 65x6 mm y 400 mm de largo. Este acero presenta un contenido de elementos químicos y propiedades mecánicas que se encuentra dentro de los valores establecidos en la norma (ASTM A36, 2014), estas propiedades se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química y propiedades mecánicas del acero estructural utilizado.

	Descripción	Valor
Composición Química	Carbono, C [%]	0,094
	Manganoso, Mn [%]	0,624
	Azufre, S [%]	0,012
	Fósforo, P [%]	0,017
	Silicio, Si [%]	0,172
Propiedades Mecánicas	Esfuerzo de fluencia [MPa]	370,9
	Resistencia a la tracción [MPa]	483,5
	Elongación en 50 mm [%]	36,4
	Dureza [HV]	146

Los perfiles estructurales a usarse reciben tratamiento superficial, a excepción del primer perfil, estos tratamientos son: pulido, lijado y esmerilado (ver Gráfico 1). Posteriormente, cada sección de perfil con variación superficial se somete a un proceso específico de galvanizado por inmersión en caliente, el cual es realizado por dos empresas diferentes. La codificación de las muestras utilizadas se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Procesos superficiales aplicados a los perfiles.

Proceso	A0 / B0	A1 / B1	A2 / B2	A3 / B3
Empresa A	Sin tratamiento superficial	Superficie pulida (papel abrasivo grano 1200)	Superficie lijada (papel abrasivo grano 60)	Superficie esmerilada (Disco BDA 443)
Empresa B				

El primer método de galvanizado corresponde a uno de tipo industrial realizado en una empresa ubicada en la ciudad de Quito (en adelante denominada empresa A), y el otro proceso de galvanizado es realizado de manera artesanal por parte de la empresa B ubicada en la ciudad de Cuenca. La diferencia entre estos procesos radica en los parámetros de galvanizado empleados por cada una de las mencionadas empresas (ver Tabla 3).

Tabla 3. Variación de los parámetros de galvanizado.

Proceso	Temperatura de inmersión [°C]	Tiempo de inmersión [s]	Enfriamiento (tiempo)
Empresa A	460	5 min	Al ambiente
Empresa B	450	1 min 20 s	Agua (10 s)

La microestructura y espesor de la capa de zinc fue analizada con el Microscopio Olympus GX41F, y el procesamiento de las figuras se realiza con el software libre Python, para mejorar la calidad de las microestructuras. Para la medición de las microdurezas se empleó el Durómetro Micro-Vickers

DUROLINE M. La carga utilizada para la indentación de las muestras fue de 100 gf con un tiempo de aplicación de 10 segundos. La rugosidad y adherencia se la cuantifica utilizando los equipos calibrados Elcometer 224 y Elcometer 510.

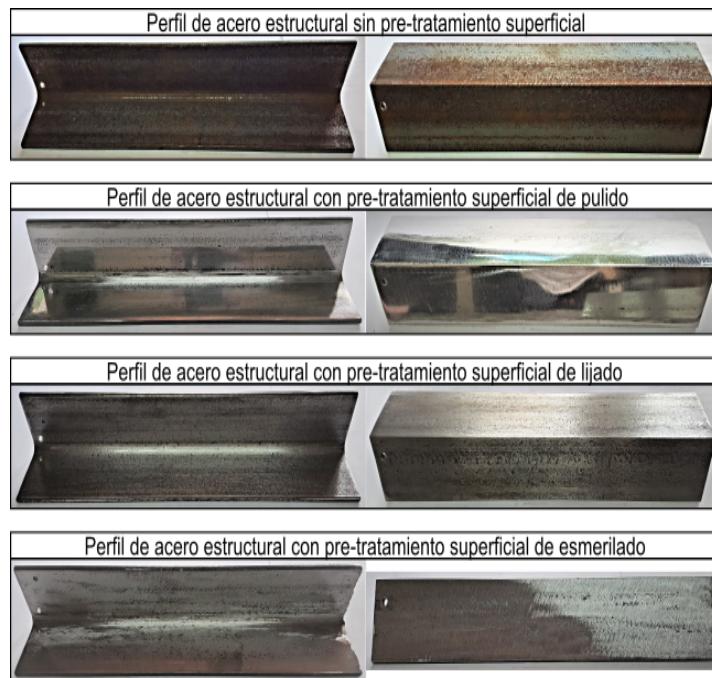


Gráfico 1. Tratamiento superficial aplicado a perfiles de estudio.

Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ESPESOR DE LA CAPA DE GALVANIZADO

A partir de los resultados presentados en el Gráfico 2, se aprecia que los perfiles galvanizados por la empresa A superan el valor mínimo de aceptación de 75 μm , establecido en la norma ASTM A123M-15.

En cuanto a las probetas de la empresa B, las muestras pulidas (B1) y esmeriladas (B3) cumplen estrechamente con los criterios de aceptación, por el contrario, los lotes sin tratamiento superficial (B0) y con superficie lijada (B2) no cumplen dicha norma.

Las diferencias de espesor entre empresas, es el resultado de emplear un menor tiempo de inmersión en el baño de zinc por parte de la empresa B.

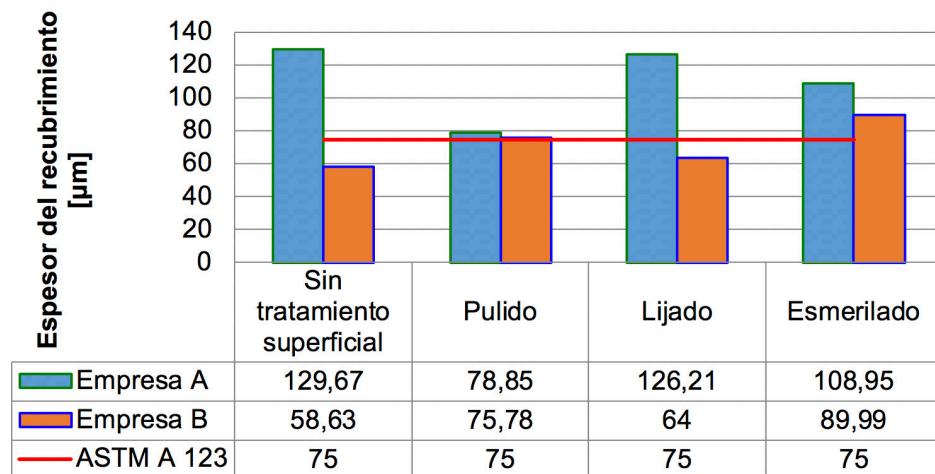


Grafico 2. Espesor de los recubrimientos obtenidos por la empresa A y B.

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, en el Gráfico 3 se aprecian las metalografías de los recubrimientos obtenidos tanto para la empresa A como para la empresa B. Así, se tiene que para ambos casos las capas protectoras se encuentran compuestas por las fases delta (δ), zeta (ζ) y eta (η), lo cual de acuerdo a Maaß (2011) es producto de combinar una temperatura de inmersión de alrededor de 450°C y un contenido de silicio que se encuentra dentro del rango Sebisty.

Se puede apreciar además que la fase gamma (γ) está ausente, y esto se debe a que a cortos períodos de inmersión del sustrato recubierto no permiten que se realice la incubación de esta fase y solamente se observa una línea entre el acero y la fase delta (Rico, 2012).

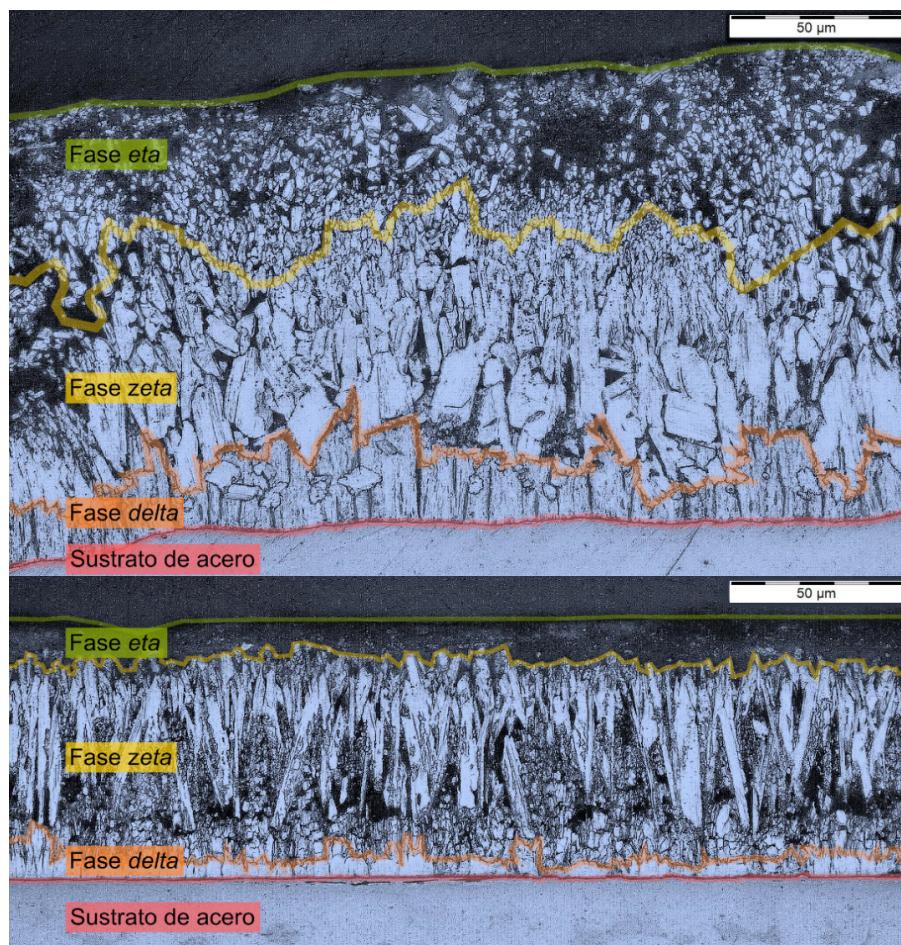


Gráfico 3. Identificación de fases en capa de galvanizado, a) empresa A, y b) empresa B.

Fuente: elaboración propia.

Del Gráfico 4 se desprende que los valores más altos de espesor de las fases eta (η), zeta (ζ) y delta (δ) son obtenidos en la capa de galvanizado aplicado por la empresa A. Esto se explica por el control en cuanto a la temperatura y velocidad de enfriamiento adoptados por esta empresa, ya que las fases eta (η), zeta (ζ) y delta (δ) dependen de parámetros como: la temperatura del zinc fundido y la velocidad con la cual el calor es extraído durante la solidificación.

Las bajas velocidades de enfriamiento de la fase zeta son favorecidas con la difusión de sus cristales a través de la fase eta (Rico, 2012). Con altas velocidades de enfriamiento como las usadas por la empresa B, la fase delta presenta un desarrollo limitado (American Galvanizers Association, 2016).

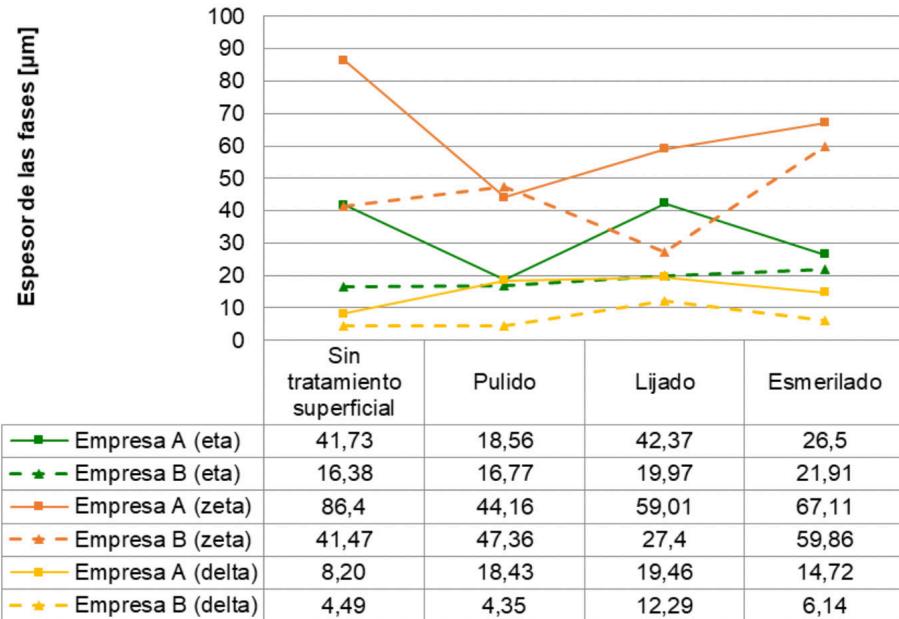


Gráfico 4. Espesor de fases en la capa de galvanizado empresa A y empresa B.

Fuente: elaboración propia.

Analizando las estructuras cristalinas de las fases se tiene que, la fase zeta presente en los recubrimientos obtenidos en la empresa A, presentan cristales equiaxiales, pequeños y menos desarrollados, mientras que los de la empresa B son de tipo columnar y en los que resulta común encontrar una frontera tenue dentada entre la fase zeta y delta. Hay que añadir que resultados similares fueron observados por Cervantes, et al. (2013) y Valdés (2010). Así también, algunos productos de la empresa A presentan una grieta horizontal a lo largo de la fase zeta, resultado de emplear temperaturas de inmersión mayores a 450 °C (Maaß, 2011).

Por tanto, al observar la apariencia superficial de los perfiles galvanizados, se obtiene que los elaborados por la empresa A son de aspecto poco brillante combinado con zonas opacas o incluso de aspecto gris mate, debido a la difusión de cristales individuales de la fase zeta a través de la eta,

pues procesos contiempo s de inmersión grandes producen mayores tiempos de enfriamiento y dan como resultado la reacción metalúrgica entre el zinc y el hierro (American Galvanizers Association, 2016), en la cual el hierro tomado de la fase delta se difunde hasta la superficie del recubrimiento, brindándole así su aspecto mate (Valdés, 2010).

Por el contrario, los recubrimientos de la empresa B poseen una fase zeta con cristales extendidos a lo largo de la superficie del acero y una fase delta esporádica y de espesor limitado. Este comportamiento resulta de aplicar una elevada velocidad de enfriamiento, misma que provee una estructura cristalina más fina y una capa de zinc puro sobre las superficies intermetálicas (American Galvanizers Association, 2016).

Finalmente, las propiedades del recubrimiento van a estar determinadas fundamentalmente por el tamaño y arreglo de los cristales individuales. Estos cristales, pueden crecer a partir de los ya existentes y serán cristales grandes, pero en pequeñas cantidades, o también pueden crecerse nuevos cristales a partir de la formación de núcleos y tendrán depósitos de granos más finos, pero en mayor cantidad. Los depósitos finos son más tersos, brillantes, duros y resistentes, pero menos dúctiles a comparación de los gruesos. Por ello, se señala que el tamaño de las partículas y su naturaleza determinan la resistencia y dureza del recubrimiento (Valdés, 2010).

3.2. RUGOSIDAD DEL RECUBRIMIENTO DE ZINC

En base a los resultados mostrados en el Gráfico 5, se obtiene que los valores de rugosidad para los lotes galvanizados por la empresa A, presentan un comportamiento creciente, manteniendo el siguiente orden: perfil sin tratamiento superficial, esmerilado, lijado y pulido. El incremento de la rugosidad se explica con ayuda del trabajo realizado por (Gill y Langill, 2005), en el cual mencionan que: un recubrimiento en donde la fase eta es consumida completamente por la capa zeta y que es expuesta a la superficie, presenta un perfil de superficie de elevada rugosidad, mientras que si la fase eta se encuentra intacta se presentará una superficie lisa.

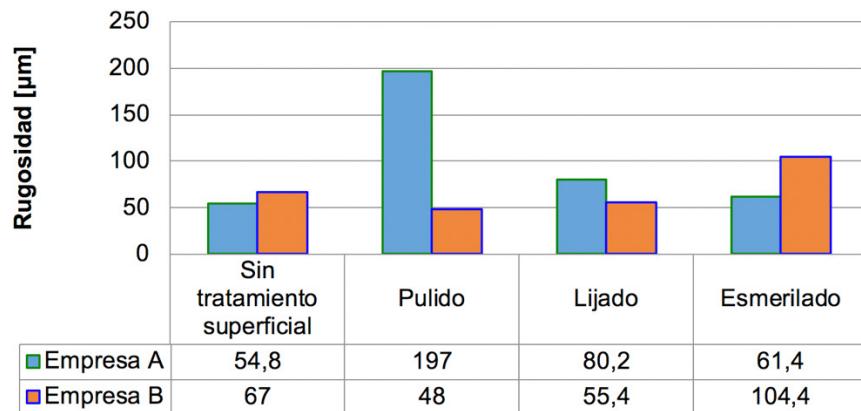


Gráfico 5. Rugosidad superficial en la capa de galvanizado.

Fuente: elaboración propia.

En contraste, para la empresa B, los espesores de galvanizado son más delgados y su rugosidad aumenta (48 – 104,4 micras) en un orden diferente al dado para la empresa A, este orden es: superficie pulida, lijada, sin tratamiento superficial y esmerilado. Como ya se explicó anteriormente, las altas velocidades de enfriamiento aplicadas por esta empresa, permiten la obtención de una fase zeta de zinc puro de aspecto brilloso y más liso.

En ciertas circunstancias, una capa de galvanizado lisa y brillante es deseable, ya que existen menos posibilidades de retener partículas o contaminantes que pueden inducir a corrosión el recubrimiento de zinc. En recubrimientos con valores de rugosidad elevada existirá mayor posibilidad de incrustación de contaminantes o que se acumulen sustancias corrosivas sobre su superficie, lo cual favorecerá a la corrosión.

Una capa de galvanizado lisa y brillante es deseable, ya que existen menos posibilidades de retener partículas o contaminantes que pueden inducir a corrosión el recubrimiento de zinc.

3.3. DUREZA DEL RECUBRIMIENTO POR MICRO-INDENTACIÓN

Para este ensayo, la indentación se realiza en la zona central del recubrimiento como se muestra en el Gráfico 6, por lo que, en las muestras de mayor espesor, la indentación se ubica en la fase más gruesa correspondiente a la capa zeta, y en aquellos recubrimientos delgados la marca

puede llegar a abarcar las fases zeta, eta y delta. Los valores promedio de microdureza de la capa de galvanizado zeta se muestran en el Gráfico 7, encontrándose sus valores entre un valor mínimo de 123.76 [HV] y un máximo de 179.68 [HV] para aquellas probetas galvanizadas por la empresa A, y entre 121.49 [HV] y 127.57 [HV] para la empresa B.



Gráfico 6. Tamaño de indentación en capa zeta, muestra empresa A.

Fuente: elaboración propia.

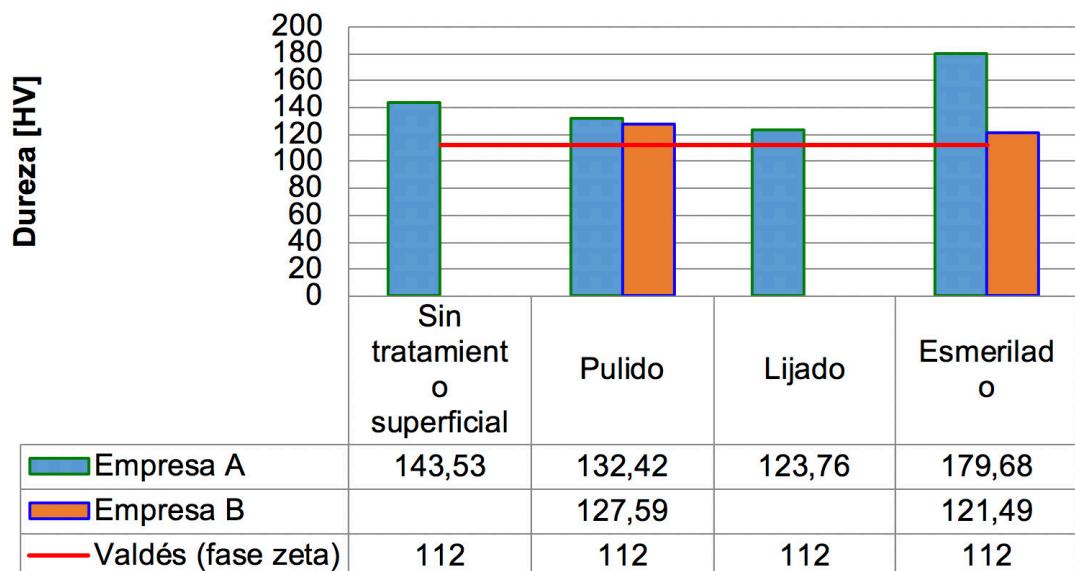


Gráfico 7. Durezas obtenidas en capa zeta de muestras con diferente calidad superficial.

Fuente: elaboración propia.

Resulta complicado obtener la dureza de recubrimientos muy delgados, tal como sucede con los recubrimientos del perfil sin tratamiento superficial y con superficie lijada de la empresa B, ya que en la medición, la marca del indentador además de las 3 fases llega a marcar también al acero

y/o la resina de montaje (ver Gráfico 8). O, por otra parte, si la marca del indentador abarca solo las tres fases de aleación, en las zonas más suaves y de mayor espesor que son las capas zeta y eta, el indentador penetrará más, mientras que en la zona más delgada y dura que es la fase delta, el indentador penetrará menos y entonces las esquinas opuestas de la marca aparecerán en diferentes planos, generándose así una diferencia pronunciada entre estas diagonales, lo cual es rechazado por la norma (ASTM E384, 2017).

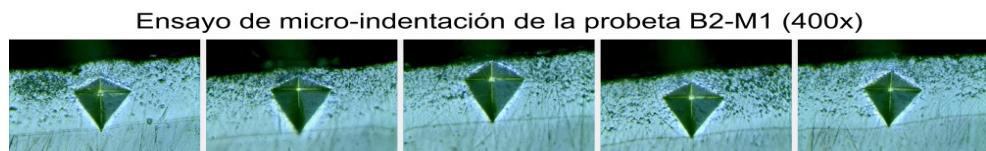


Gráfico 8. Tamaño de indentación en capa zeta, muestra empresa B.

Fuente: elaboración propia.

Tomando en consideración la investigación de Valdés (2010), los valores de dureza de la zona zeta obtenidos en este estudio, superan los 112 HV de la fase zeta del mencionado autor.

3.4. ADHESIVIDAD DEL RECUBRIMIENTO

En el Gráfico 9 se muestra el esfuerzo requerido para desprender la capa de galvanizado tanto para los lotes de la empresa A como de la empresa B. Los máximos valores de adherencia son alcanzados por aquellas probetas cuya superficie ha sido pulida (A1) y esmerilada (A3) para el caso de la empresa A, y para la empresa B los máximos valores se obtienen en las probetas sin tratamiento superficial (B0) y esmeriladas (B3).

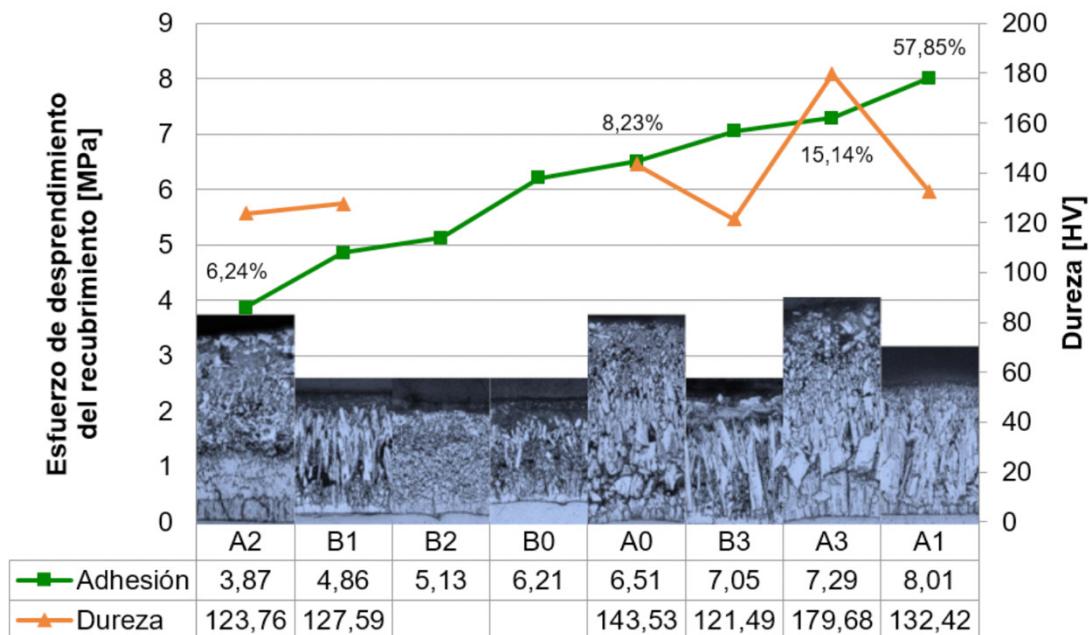


Gráfico 9. Relación existente entre adhesión, dureza y estructura metalográfica.

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de validar los resultados de adhesión obtenidos en este estudio, se cuenta con el trabajo de investigación realizado por Handay Takazawa (1998), quienes utilizan un sistema dúplex de zinc fundido y poliéster rociado sobre una placa de acero de 4 mm de espesor. El recubrimiento de zinc tiene un espesor de 100 μm y el ensayo de adhesión realizado con una muñeca de 20 mm de diámetro presenta un esfuerzo de desprendimiento de aproximadamente 3 MPa. Al comparar este esfuerzo con los obtenidos en el presente estudio, se tiene que el menor valor de esfuerzo (3.87 para la muestra A2) es un 29% superior, para la muestra con tratamiento superficial de pulido (A1) el incremento se encuentra en el orden del 167%, determinándose que la capa de galvanizado aplicada a todas las muestras ensayadas no presenta la posibilidad de desprendimiento durante su manipulación, como sí lo harían los recubrimientos excesivamente gruesos ($>300 \mu\text{m}$) (Nordic Galvanizers, 2017). El Gráfico 10 muestra el grado de desprendimiento de la capa de galvanizado en la muestra A1.



Gráfico 10. Porcentaje de desprendimiento de la capa de recubrimiento en la probeta A1.

Fuente: elaboración propia.

3.5. RELACIÓN ENTRE ADHESIÓN, DUREZA Y ESTRUCTURA METALOGRÁFICO DEL RECUBRIMIENTO

La microestructura de un material es muy importante, ya que ayuda a explicar comportamientos mecánicos inusuales. En este estudio los valores más bajos obtenidos de dureza y adherencia de la capa galvanizada pertenecen a la muestra A2. La presencia de microfisuras en la fase delta determina que al ser expuestas a los esfuerzos de tracción durante el ensayo de adherencia, estas microfisuras crezcan y continúen desplazándose hasta alcanzar la superficie desprendiendo la capa delta del sustrato.

Las altas velocidades de enfriamiento aplicadas a las muestras B1, B2 y B0 permiten obtener valores de adhesión mayores a los obtenidos en la muestra A2. La formación de la capa zeta es importante, puesto que, al presentar una forma de agujas como en el caso B1, una estructura granular como en el caso B2 y una mezcla de estas dos microestructuras como en el caso B0, se tiene una dureza y resistencia creciente, pero su flexibilidad se ve afectada y ante altos esfuerzos la tendencia es a fallar de forma frágil, por lo que es necesario indicar que la presencia de porosidades en esta fase también contribuye a la falla del recubrimiento.

En cuanto a los valores más altos de dureza y adherencia de las muestras A0, B3, A3 y A1, tiene mucho que ver con la mayor presencia de la fase zeta y la forma en que se presenta microestructuralmente. Para los casos A0 y A3, ésta fase se muestra con presencia de granos equiaxiales de tamaño variado y de mayor espesor, sin embargo, para la muestra A3 la presencia de porosidades y defectos es menor por lo que su comportamiento a la adherencia es bueno. Para los casos B3 y A1, es algo singular, las dos microestructuras son parecidas con una fase zeta predominante y de gran espesor, sin embargo,

la muestra B3 presenta en su microestructura una fase zeta mixta con placas verticales y gránulos, así como la presencia de la fase eta, la cual es menos dura que la fase zeta y esto causa que su microdureza se vea reducida. En cuanto a la muestra A1, la fase zeta es alargada muy compacta, la fase delta y eta tienen un espesor muy pequeño, lo que implica una mayor resistencia y adherencia. Finalmente, se tiene que la tenacidad y ductilidad del galvanizado, así como su grado de adhesión dependen del tipo de microestructura generada después del proceso de enfriamiento y de cómo se encuentran distribuidas las fases eta, zeta y delta en la capa de galvanizado.

3.6. DESPRENDIMIENTO DE LA CAPA DE GALVANIZADO EN EL ENSAYO DE PULL-OFF

Realizado el ensayo de Pull-Off, se toma un ejemplar tanto de la empresa A como de la empresa B, para analizar cómo fue el desplazamiento de las grietas durante el ensayo. En la muestra con tratamiento superficial de pulido de la empresa A (ver Gráfico 11-a) se presenta un desprendimiento a lo largo de la zona inferior de la fase zeta, lugar donde existen microgrietas. Además, la fractura se desplaza a lo largo de los espacios intercristalinos, siendo esta zona menos resistente que la unión entre la fase zeta y delta. En contraste, en la muestra de la empresa B con el mismo tratamiento superficial (ver Gráfico 11-b), los cristales de la fase zeta alargados y en forma de aguja con espesor delgado tienen mayor resistencia a la tracción, de modo que superan la adhesión que existe entre la fase delta y el sustrato, ocasionando el posterior desgarre de la superficie del acero.

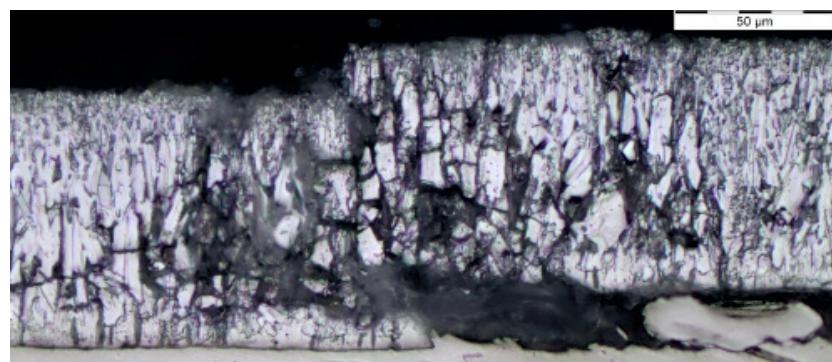


Gráfico 11a. Falla del recubrimiento en ensayo Pull-Off para muestra A1, empresa A.

Fuente: elaboración propia.

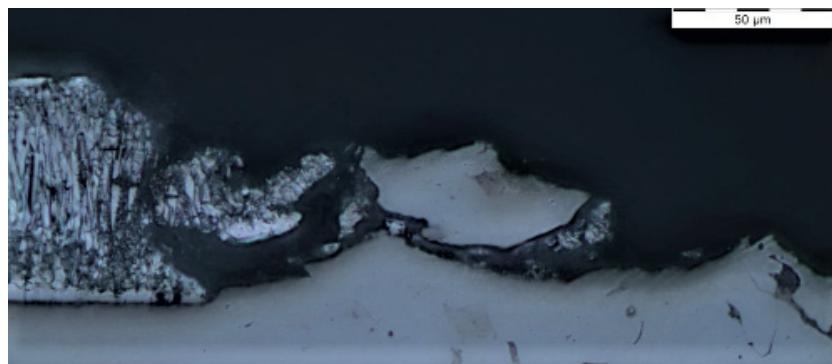


Gráfico 11b. Falla del recubrimiento en ensayo Pull-Off para muestra B1 de la empresa B.

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, se tiene que las muestras de la empresa A presentan desprendimientos de carácter cohesivo en el recubrimiento, ya que la ruptura se produce en una de las fases de aleación, mientras que la empresa B presenta un fallo cohesivo del sustrato metálico, pues el acero falla antes que la interface sustrato-recubrimiento. De acuerdo al estudio realizado por Pardo (2006), cuando la falla tiene lugar en el sustrato metálico, se considera sobredimensionada la zona de unión y la calidad adhesiva del recubrimiento será superior a la mecánicamente necesaria.

Por consiguiente, si la superficie metálica queda desnuda debido al desprendimiento del recubrimiento, la durabilidad y la resistencia a la corrosión del sistema pueden verse afectadas. Mientras que, en el desprendimiento de carácter cohesivo del recubrimiento, el arranque se produce a lo largo de la fase zeta, en el cual queda adherido al sistema un remanente de esta capa y por debajo de esta una fase delta intacta, lo cual resulta beneficioso pues esta fase posee un elevado valor de dureza y además tendrá la capacidad de seguir brindando protección contra la corrosión al sustrato metálico.

4. CONCLUSIONES

Todas las muestras galvanizadas a 460 °C, por 5 minutos y enfriadas al aire, presentan una capa de revestimiento de zinc acorde a especificación en cuanto a espesor, de ahí su buen comportamiento mecánico, aunque si la rugosidad es un factor a tener en cuenta, las probetas sin tratamiento superficial o superficie esmerilada, son una buena opción.

El comportamiento de la capa de galvanizado está muy ligado al espesor y microestructura que presenta la fase zeta, cuando la microestructura presenta cristales de forma granular, el recubrimiento presenta durezas en el rango de 132 a 180 [HV]. Por el contrario, si los cristales son en forma de agujas alargadas, las durezas se encuentran en el orden de 121 a 128 [HV]. Estas variaciones microestructurales y de dureza se deben a los tiempos y velocidades de enfriamiento aplicados por cada empresa y defectos internos.

La baja resistencia a la adherencia que presentan las muestras A2, B1, B2 y B0, está muy relacionada con la presencia de defectos al interior de la fase zeta, las microfisuras y vacíos se convierten en concentradores de esfuerzos que multiplican la carga aplicada durante el ensayo de Pull-Off, ocasionando que la fractura se desplace por los espacios intercristalinos para el caso de la empresa A. En el caso de la empresa B al tener una predominancia de la fase zeta y la microestructura tipo aguja, el desprendimiento se produce arrancando parte del sustrato.

Espesores gruesos de la fase eta conferirán una mayor vida útil y resistencia a la corrosión al sustrato cuando éste se encuentre en ambientes húmedos. Así también, es importante el espesor de la fase delta, ya que al ser la capa que mayor dureza presenta, en caso de desprendimiento de la fase eta y zeta a causa de una falla cohesiva de capa de aleación hierro-zinc, el material de zinc restante que queda adherido al sustrato continúa brindando protección contra la corrosión.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGA (American Galvanizers Association). (2016). Inspección de Productos de Acero Galvanizado en Caliente. Recuperado de: <https://galvanizeit.org/education-and-resources/publications/inspeccion-de-productos-de-acero-galvanizado-en-caliente>

Cervantes, J., Barba, A., Hernández, et al. (2013). Obtención y caracterización de recubrimientos Zn-Al-Cu por inmersión en caliente sobre aceros de bajo carbono. Revista de Metalurgia, 49(5), pp. 351-359. doi: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1316>

Gill, M. y Langill, T. (2005). The Slip Resistance of Galvanized Surfaces. En Galvanizing Note: process and design notes on hot-dip galvanizing. American Galvanizers Association. Recuperado de: [https://www.galvanizeit.org/images/uploads/memberGalvanizingNotes/SlipResistanceofGalvanizedSurfaces,MattGillThomasLangillPh.D_.\(GalvanizingNotes,2005Jan\).pdf](https://www.galvanizeit.org/images/uploads/memberGalvanizingNotes/SlipResistanceofGalvanizedSurfaces,MattGillThomasLangillPh.D_.(GalvanizingNotes,2005Jan).pdf)

- Handa, T. y Takazawa, H. (1998). Duplex Protection System of Powder Coating and Metal Sprayng on Steel Articles. En CORROSION 98 (pp. 516). San Diego, Estados Unidos: NACE International. Recuperado de: <https://store.nace.org/98516-duplex-protection-system-of-powder>
- Kuklik, V. y Kudlacek, J. (2016). Hot-Dip Galvanizing of Steel Structures. New York, Estados Unidos: Elsevier.
- Maaß, P. y Peißker, P. (2011). Handbook of hot-dip galvanization. Wangen, Alemania: John Wiley & Sons.
- Nordic Galvanizers. (2017). Steels suitable for galvanizing. Suecia: Nordic Galvanizers. Recuperado de: <http://www.nordicgalvanizers.com/narvar/Steelssuitableforgalvanizing.htm>
- Pardo, D. (2006). Propiedades Superficiales y Evaluación De Adherencia Mecánica-Química de Laminados Metal-Polímero (Trabajo fin de grado). Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/bmfcip226p/doc/bmfcip226p.pdf>
- Rico, Y. (2012). Estructura y caracterización de los recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente, sobre aceros. Revista Digital de Investigación y Postgrado, 2(5). Recuperado de: <http://redip.bqto.unexpo.edu.ve/index.php/redip/article/view/180/88>
- Valdés, C. (2010). Galvanizado por difusión sobre aleaciones de cobre y caracterización de los revestimientos obtenidos (Tesis doctoral). Recuperado de: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/3823/tesis.pdf?sequence=1>
- Van Eijnsbergen, J. (2012). Duplex systems: hot-dip galvanizing plus painting. Amsterdam, Países Bajos: Elsevier.

