

## ESTUDIO DEL DETERIORO CORROSIVO DE COMPONENTES DE ENSAMBLAJE EN TORRES DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN

Romero, Byron <sup>1\*</sup>, Minchala, Jaime M. <sup>2</sup>, Angulo, Nerismar <sup>3</sup>, Carrasquero, Edwuin <sup>1</sup>, Gil, Linda E. <sup>3</sup>.

<sup>1</sup>: Grupo de Investigación en Caracterización, Procesamiento y Protección de Materiales. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal de Milagro, Milagro, Ecuador.

<sup>2</sup>: Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), Facultad de Sistemas y Telecomunicaciones, La Libertad, Ecuador.

<sup>3</sup>: Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre"(UNEXPO)-Vicerrectorado de Puerto Ordaz, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Centro de Estudios de Corrosión y Biomateriales (CECOB), Villa Asia, Puerto Ordaz, Edo. Bolívar, Venezuela.

\*bromeror@unemi.edu.ec

Recibido (22/02/19), aceptado (25/02/19)

**Resumen:** El objetivo del presente trabajo fue caracterizar el estado de deterioro corrosivo de los componentes galvanizados de ensamblaje de la estructura de una torre de transmisión de energía eléctrica. Para ello se realizó en primera instancia una inspección visual acompañado de un análisis metalográfico, medición de espesor del galvanizado, análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (MEB) con microanálisis químico por energía dispersiva (EDX). Los resultados obtenidos evidencian que los componentes metálicos evaluados presentan dos zonas claramente diferenciables en cuanto a tonalidad superficial: una zona clara y otra oscura, lo que indica la presencia de un deterioro corrosivo preferencial del recubrimiento. Los microanálisis químicos por EDX realizados en estas zonas reflejan que el daño por corrosión y la consecuente pérdida de espesor del recubrimiento protector de zinc de los componentes evaluados está asociado a la presencia de contaminantes atmosféricos. Se concluye que la capacidad de protección contra la corrosión del galvanizado remanente en función de la agresividad del ambiente al cual están expuesto por la cercanía de una zona industrial, es una de las principales causas del deterioro.

**Palabras Claves:** Galvanizado, torres de transmisión, corrosión, contaminantes, atmosfera industrial

## CORROSIVE DETERIORATION OF ASSEMBLY COMPONENTS IN AN ELECTRICAL TRANSMISSION TOWER

**Abstract:** The objective of this work was to characterize the corrosive deterioration of the galvanized components of assembly of the structure of an electrical power transmission tower. For this, a visual inspection accompanied by a metallographic analysis, thickness measurement of the galvanized, morphological analysis by scanning electron microscopy (SEM) with chemical microanalysis by dispersive energy (EDX) was carried out. The results obtained show that the metal components evaluated have two clearly differentiable zones in terms of surface tonality: a clear and a dark zone, which indicates the presence of a preferential corrosive deterioration of the coating. The microanalysis by EDX carried out in these zones shows that the damage by corrosion and the consequent loss of thickness of the zinc protective coating of the evaluated components is associated with the presence of atmospheric pollutants. It is concluded that the capacity of protection against corrosion of the galvanized remaining in function of the aggressiveness of the environment to which they are exposed by the proximity of an industrial zone, is one of the main causes of the deterioration.

**Keywords:** Galvanized, transmission towers, corrosion, contaminants, industrial atmosphere.

## I. INTRODUCCIÓN

Una línea de transmisión eléctrica es básicamente el medio físico mediante el cual se realiza la transmisión y distribución de la energía eléctrica y está constituida por conductores, estructuras de soporte, aisladores, accesorios de ajustes entre aisladores y estructuras de soporte, y cables de guarda usados en líneas de alta tensión, para protegerlas de descargas atmosféricas. Numerosos estudios 1-5 muestran que la corrosión es la principal causa del deterioro y falla de estas estructuras metálicas en la atmósfera, llevando a sus componentes a la pérdida de funciones o integridad estructural. Las torres de transmisión por lo general están sometidas a ambientes agresivos naturales, tales como altas temperaturas ambientales, humedad y los agentes químicos contaminantes presentes en la atmósfera. Los principales causantes que facilitan la corrosión atmosférica son el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), proveniente de la combustión de sólidos y líquidos que contengan azufre y el cloruro de sodio (NaCl), el cual se incorpora a la atmósfera desde el mar o desde plantas industriales 1,2. En años recientes<sup>6</sup>, el énfasis de los operadores de líneas de transmisión se da en el mantenimiento preventivo/ predictivo para asegurar la operación eficiente y confiable. Los elementos cruciales de esta estrategia son la aplicación consistente de la tecnología de punta, y la supervisión sistemática de las líneas de energía eléctrica. En tal sentido, en el presente trabajo se evalúa y correlaciona el estado de deterioro por corrosión de componentes de una torre de transmisión que forma parte de un tramo de línea de alta tensión, con respecto a la ubicación de la misma en un ambiente corrosivo atmosférico agresivo debido a la cercanía de ésta a una zona industrial con presencia de empresas que generan contaminantes propios de su actividad industrial, aunado además, a la cercanía de la línea de transmisión a afluentes fluviales que potencian el grado de agresividad del medio. Para este estudio se evaluaron los componentes galvanizados más críticos de la estructura de la torre tales como: pin de un aislador, grillete de sujeción, sistemas de ensamblaje (tornillería) y un perfil estructural. La presente investigación se divide en las siguientes secciones: la introducción donde se aborda la importancia del fenómeno de la corrosión en el deterioro de las torres de transmisión y su correlación con la influencia de los contaminantes atmosféricos. El desarrollo donde se presenta la metodología experimental para la evaluación del deterioro de los componentes de la torre, basándose en el método característico para la caracterización de materiales, también se presenta la sección de resultados acordes al objetivo del estudio en secuencia lógica, seguido de la discusión de los mismos, donde se confrontan los resul-

tados obtenidos a través de los diferentes ensayos y se proponen las causas que generaron el daño por corrosión y la consecuente pérdida de espesor del recubrimiento protector de zinc de los componentes evaluados y finalmente se presentan las conclusiones derivadas de la investigación con los respectivos argumentos que las sustentan.

## II. DESARROLLO

### 1. Métodos y Materiales.

Para la evaluación del deterioro corrosivo de los componentes galvanizados de la torre se realizaron los siguientes análisis:

**Inspección visual y selección de muestras representativas.** Se realizó registro fotográfico de los componentes. Se seccionaron muestras en tamaños manipulables para evaluar el estado del galvanizado de los componentes de la torre.

**Análisis químico.** Se determinó la composición química del acero sin galvanizar mediante Espectroscopia de Emisión Óptica.

**Análisis metalográfico.** Las muestras en sección transversal fueron preparadas metalográficamente hasta obtener una superficie especular para ser observadas por microscopía óptica empleando un microscopio óptico Nikon DS 100 acoplado con un analizador de imagen LECO IA 32. El análisis de inclusiones se realizó en la sección longitudinal de la muestra, según la norma ASTM E 45-05(7), donde se reportan los peores campos encontrados para las series gruesas y finas.

**Determinación de espesor del recubrimiento de galvanizado.** Se evaluaron acorde a Norma ISO 1463-2003(8) secciones transversales preparadas metalográficamente con el uso de un microscopio óptico NIKON DS 100 OLYMPUS acoplado con un analizador de imagen LECO IA 32.

**Análisis del deterioro por corrosión:** se utilizó la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) y microanálisis por energía dispersiva de Rayos X (EDX) para evaluar la integridad de los recubrimientos galvanizados con respecto al daño por corrosión. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca PHILLIPS XL 30 con un detector EDX de ventana liviana de berilio, modelo EDAX DL4.

## III. RESULTADOS

### A. Inspección Visual.

En las Figuras 1, 2 y 3 se muestran los componentes de ensamblaje de la torre seleccionados: pin del aislador, perfil, tornillo y grillete de sujeción, de la torre a

evaluar, destacándose en todas las muestras la presencia de dos zonas con diferencia en cuanto a tonalidad: una zona clara y oscura, lo que indica la presencia de un deterioro preferencial del recubrimiento galvanizado, aso-

ciado a una deposición preferente de los contaminantes provenientes de una zona industrial cercana, que traen los vientos predominantes y que impactan directamente sobre los elementos de la torre.

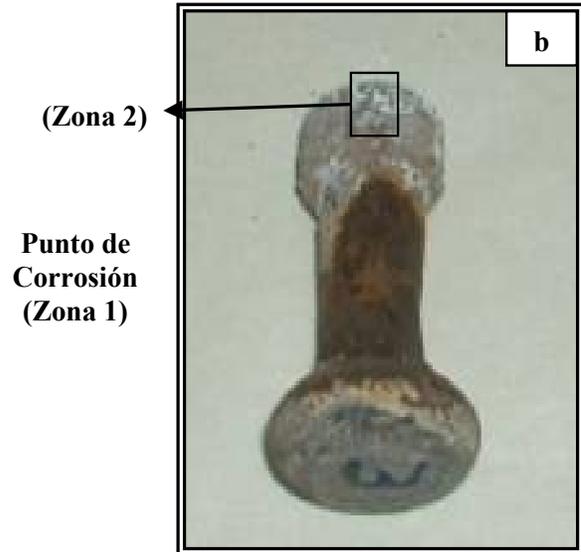
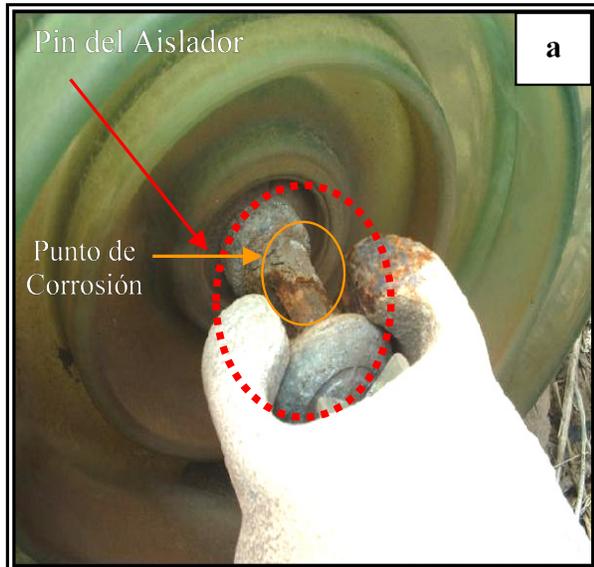


Figura 1: (a) Aislador de las torres, donde se detalla que el Pin del mismo se encuentra corroído y (b) Coraza del aislador que detalla dos zonas con características diferentes en cuanto a tonalidad se refiere.

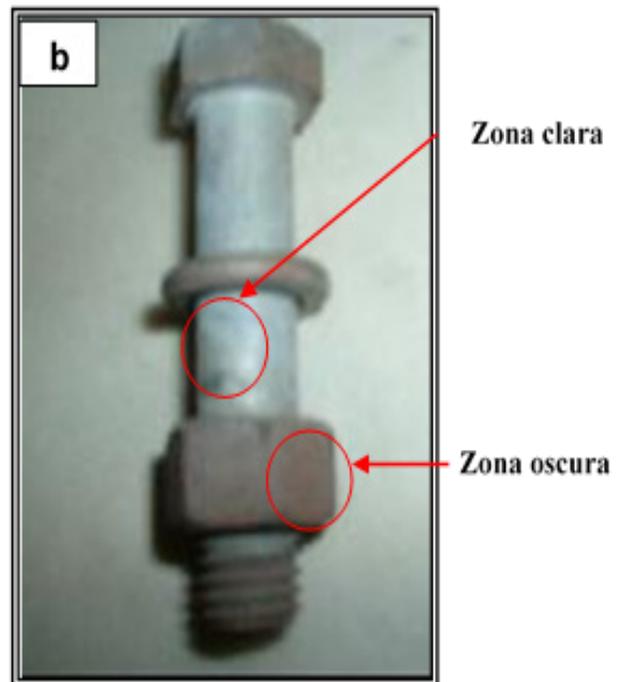
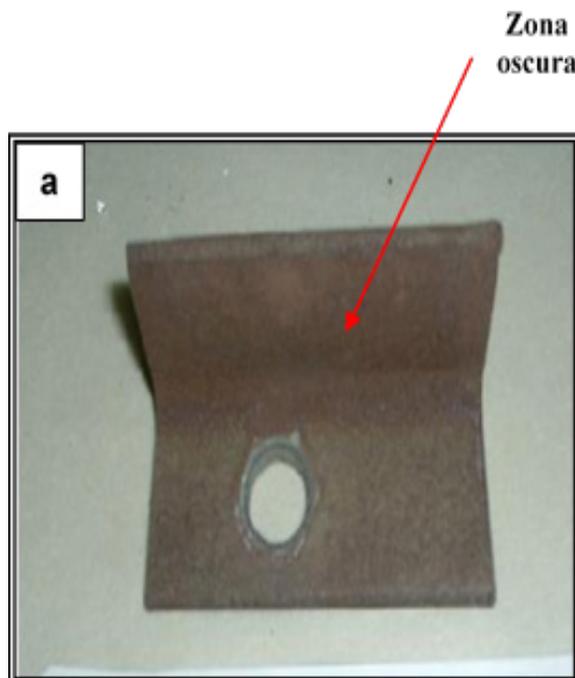
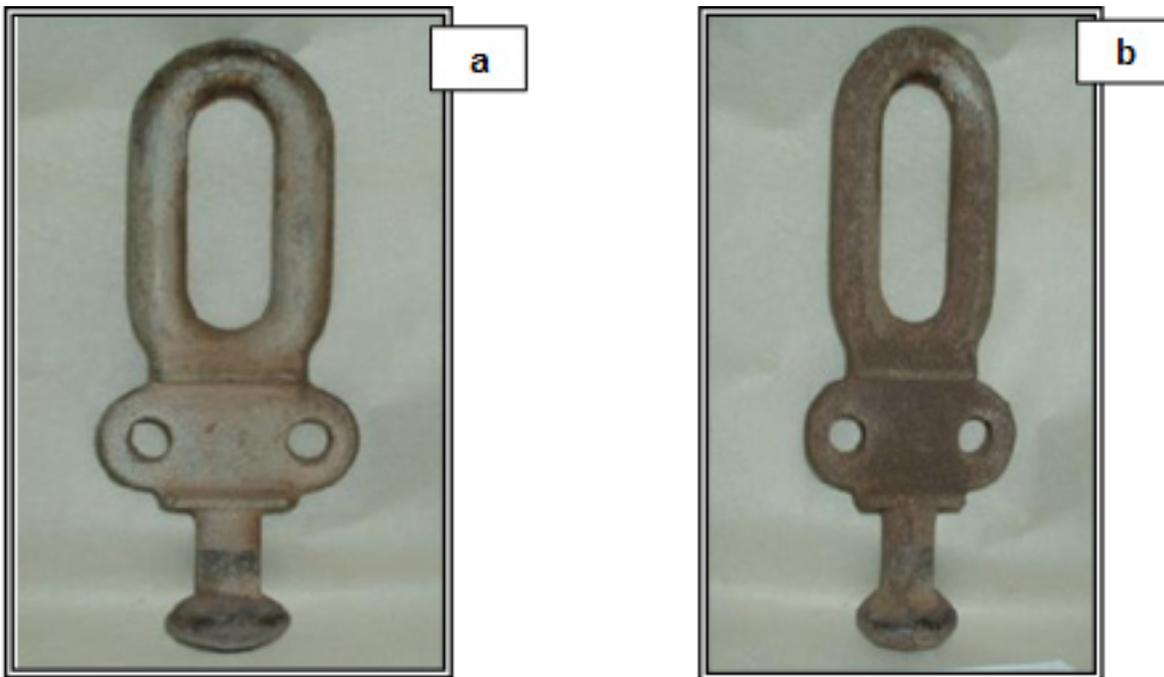


Figura 2: (a) El perfil, en el cual se evidencia la zona oscura y (b) tornillo de sujeción, donde se detalla también las dos zonas con diferencia en tonalidad que se observan en las muestras anteriores.



**Figura 3: Grillete de Sujeción visto por ambas caras, (a) zona clara. (b) zona oscura.**

Es importante destacar que el galvanizado es un recubrimiento de tipo ánodo de sacrificio es decir, su función es corroerse y así proteger la pieza recubierta (2-4). En general el tipo de productos de corrosión formados en la superficie del acero galvanizado dependen de los contaminantes presentes en el ambiente y del tiempo o periodo de exposición.

### B. Análisis químico

En la tabla I se indican los resultados del análisis químico del perfil de la torre, el cual se corresponde con la composición química de un acero estructural ASTM A36(9), lo que concuerda con lo esperado para uso en torres de transmisión de energía eléctrica.

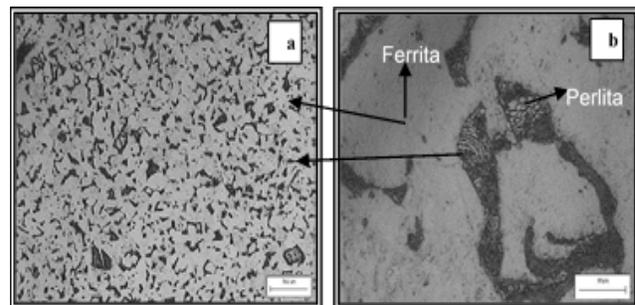
**TABLA I. COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO BASE PERFIL DE LA TORRE**

Elemento	Porcentaje (%)	Norma
C	0,16	ASTMA 36 0,26 max.
Mn	0,40	0,85- 1,35
Cu	0,26	0,20 min
Si	0,017	0,40 max
S	0,015	0,05 max
P	0,010	0,04 max

### C. Análisis metalográfico por Microscopía Óptica y determinación del espesor del Galvanizado en los componentes de la torre evaluados

De acuerdo a la norma ASTM E-45(7), se determinó

el nivel de inclusiones, reportándose para los cuatro componentes de la torre, la presencia de inclusiones de silicatos de nivel  $\frac{1}{2}$  para la serie fina y óxidos de la serie fina para un nivel de  $\frac{1}{2}$ . La norma de fabricación para este material no establece límites para este parámetro. En la Figura 4 se presenta imágenes por microscopía óptica en las que se muestran las fases presentes de la matriz de acero (sustrato) representativa, de los componentes pin del aislador, perfil, tornillo de sujeción y grillete, donde se evidencia una microestructura formada por ferrita (fase blanca) y perlita (fase oscura), la cual es propia de un acero al carbono.



**Figura 4: Imágenes por microscopía óptica de microestructura representativa de los diferentes componentes estudiados. (a) la microestructura de la matriz (acero) en sección transversal atacada con Nital. Se observa dos fases bien diferenciadas, Ferrita (zona clara) y Perlita (zona oscura) b) Detalle a mayor aumento 1000X.**

C1. Determinación de espesor del recubrimiento galva-

nizado de los componentes de ensamblaje:

#### a) Pin del aislador

Considerando que la pérdida de espesor es un indicador del comportamiento ante la corrosión de los materiales metálicos, se realizaron mediciones del espesor remanente del galvanizado al pin del aislador, en diferentes zonas. En la Figura 5, se muestra una imagen de la sección transversal del pin del aislador ubicada en la zona de mayor deterioro (zona oscura, Figura 1b), donde se evidencia el sustrato de acero, y las diferentes zonas del recubrimiento. En la tabla III se presentan los espesores determinados. El espesor promedio determinado aun después de tener 17 años de servicio de la torre, es superior ( $145\mu\text{m}$ ) al mínimo establecido en las normas ASTM A 123-00 (10) y ASTM A 153-03 (11), para productos de aceros galvanizados en caliente para la industria eléctrica.

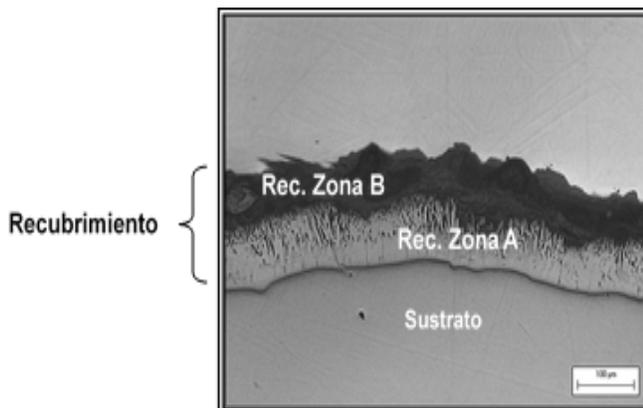


Figura 5: Imagen por microscopía óptica de la sección transversal del recubrimiento del pin aislador en la zona de mayor deterioro (zona oscura) sin ataque químico.

TABLA. III RESULTADOS DE LOS ESPESORES DETERMINADOS EN EL PIN GALVANIZADO DEL AISLADOR.

Nº	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	
	Rec. Zona A	Rec. Zona B
1	85,71	71,43
2	92,86	71,43
3	89,29	67,86
4	71,43	53,57
5	89,29	89,29
6	85,71	60,71
7	64,29	71,43
8	71,43	64,29
9	64,29	75,00
10	67,86	64,29
$X \pm \delta$	$76,99 \pm 10,66$	$68,93 \pm 9,04$
Espesor total ( $\mu\text{m}$ )		<b><math>145,92 \pm 9,85</math></b>

#### b) Perfil de las estructura de la torre

En la Figura 6 se presenta una imagen de la sección transversal del perfil en la zona de contraste más claro (de menor deterioro) que se observó en la inspección visual (Figura 2a). Se evidencia las capas presentes en el recubrimiento galvanizado y el sustrato de acero. En la tabla IV se reportan los espesores indicando que el recubrimiento tiene un espesor remanente promedio de 330 micrones

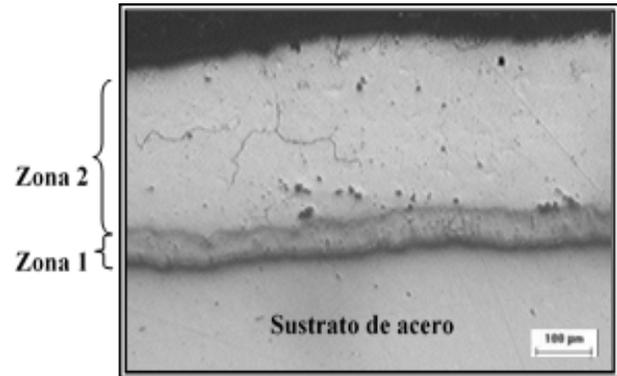


Figura 6: Imagen por microscopía óptica de la sección transversal en el recubrimiento del perfil sin ataque químico.

TABLA III RESULTADOS DE LOS ESPESORES DETERMINADOS EN EL PERFIL

Nº	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	
	Zona 1	Zona 2
1	53,85	265,38
2	50,00	269,23
3	53,85	276,92
4	57,09	284,62
5	61,54	284,62
6	53,85	280,77
7	52,78	269,23
8	58,65	273,08
9	51,56	284,62
10	50,15	269,20
$X \pm \delta$	$54,33 \pm 3,54$	$275,77 \pm 7,11$
Espesor total ( $\mu\text{m}$ )		<b><math>330,07 \pm 5,33</math></b>

La norma ASTM A 123-00(10) para productos de aceros galvanizados en caliente para la industria eléctrica, refiere que el espesor mínimo para chapas recubiertas debe ser  $100\mu\text{m}$ . El valor determinado aún supera ampliamente este espesor considerando que al momento de la entrega de las muestras, la torre tenía 17 años en servicio, por lo que esta pieza no ha sufrido un daño significativo en esta zona de tonalidad clara. En la Figura 7, se presenta una imagen de la sección transversal del perfil, en la zona oscura del perfil que se observó en la inspección visual (Figura 2a). Nótese que el galva-

nizado ha disminuido considerablemente de espesor en esta zona y no se encuentra en buenas condiciones. En la tabla IV se presentan los resultados de los espesores determinados al recubrimiento remanente, donde se reporta un valor promedio de espesor de 64,74µm, el cual está por debajo de lo mínimo aceptable.

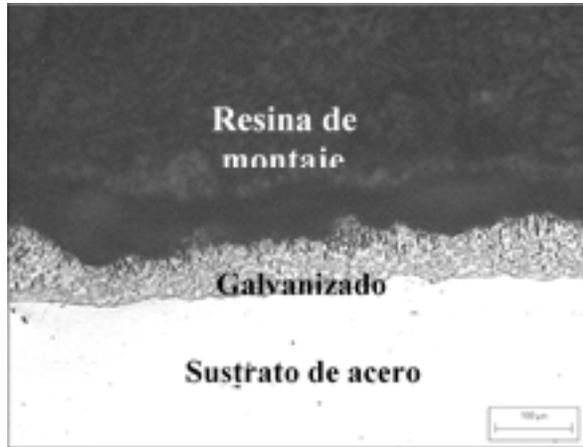


Figura 7: Imagen por microscopia óptica de la sección transversal en el recubrimiento del perfil en una zona deteriorada del galvanizado sin ataque químico.

TABLA IV. ESPESOR REMANENTE EN ZONA DETERIORADA DEL GALVANIZADO DEL PERFIL.

N°	Esesor (µm)
	Zona 1
1	86,96
2	52,17
3	47,83
4	47,83
5	56,52
6	78,26
7	60,87
8	52,17
9	69,57
10	65,22
$X \pm \delta$	61,74 ± 12,57

Es importante destacar que si comparamos el espesor del recubrimiento en la zona de mayor deterioro del perfil (61.74 micrones) con el de la zona clara (330,1 micrones), el espesor remanente en la zona oscura es menor en un 81%, por lo que en esta zona está comprometida la resistencia a la corrosión.

### c) Tornillo

En la Figura 8 se muestra una imagen obtenida en sección transversal del tornillo en la zona clara que se observó en la inspección visual (Figura 3b). Se evidencia el sustrato de acero y el recubrimiento galvanizado. La tabla V presenta el espesor del galvanizado medido.

Nótese que el valor promedio se encuentra aún por encima del mínimo establecido en la Norma ASTM A 153-03 para tornillería, tuercas, pernos y pines, de 71m11.

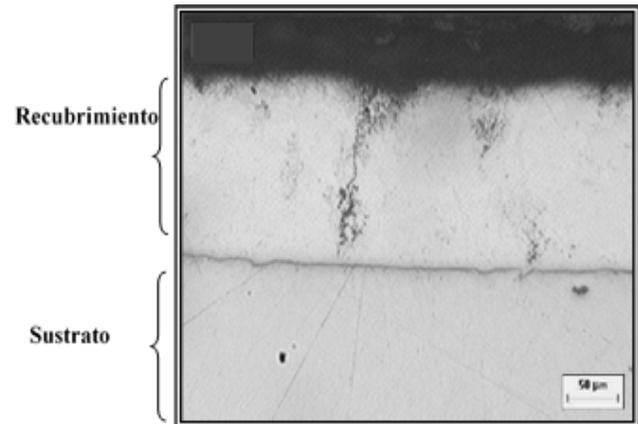


Figura 8: Imagen de microscopia óptica de la sección transversal del recubrimiento del tornillo sin ataque químico.

TABLA. V. RESULTADOS DEL ESPESOR EN UNA ZONA CLARA DEL TORNILLO.

N°	Recubrimiento
1	154,76
2	152,38
3	150,00
4	157,14
5	154,85
6	151,25
7	156,55
8	153,25
9	151,86
10	151,74
$X \pm \delta$	153,38 ± 2,24

En la Figura 9 se muestra una imagen de la sección transversal del tornillo en una zona oscura evidenciada en la inspección visual (Figura 2b), donde se evidencia el sustrato de acero y las dos zonas del galvanizado remanente. En la tabla VI se reportan espesores de las distintas zonas. Nótese el bajo valor obtenido de estas mediciones de espesores.

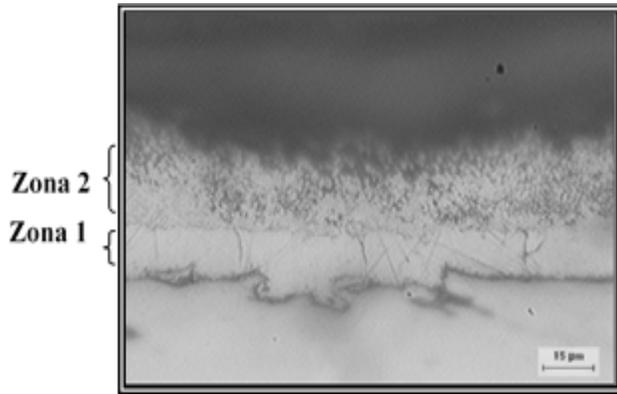


Figura 9: Imagen por microscopía óptica de la sección transversal del recubrimiento del tornillo sin ataque químico.

TABLA VI. RESULTADOS DEL ESPESOR REMANENTE EN ZONA DETERIORADA DEL TORNILLO.

Nº	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	
	Zona 1	Zona 2
1	14,32	32,73
2	13,64	24,55
3	16,30	23,18
4	15,68	21,14
5	14,32	21,82
6	14,70	21,14
7	15,25	22,50
8	16,15	21,52
9	16,20	22,45
10	14,50	22,05
$X \pm \delta$	$15,97 \pm 0,92$	$23,31 \pm 3,29$
Espesor total ( $\mu\text{m}$ )		$39,28 \pm 2,11$

Comparando el espesor del recubrimiento en la zona oscura (39.8 micrones) con el de la zona clara (153.4 micrones), el espesor en la zona oscura es menor en un 71.50 %, lo que indica el alto nivel de deterioro corrosivo en esta zona.

#### d) Grillete de sujeción

En la Figura 10 se muestra una imagen de la sección transversal del grillete de sujeción, donde se evidencia el sustrato de acero y el galvanizado remanente de la zona clara mencionada en la inspección visual (Figura 3a). En la tabla VII se especifica el espesor del recubrimiento de galvanizado remanente, cuyos espesor promedio fue de 52 micrones.

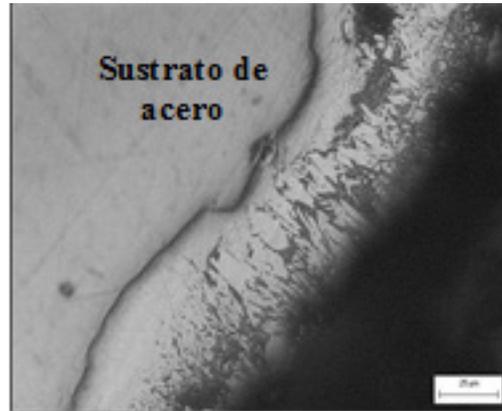


Figura 10: Imagen por microscopía óptica de la sección transversal del recubrimiento del grillete de sujeción a 300X y sin ataque químico.

TABLA VII. RESULTADOS DEL ESPESOR REMANENTE EN UNA ZONA CLARA DEL GRILLETE DE SUJECIÓN.

Nº	Espesor ( $\mu\text{m}$ )
1	54,76
2	53,57
3	47,62
4	50,00
5	48,81
6	51,15
7	54,75
8	54,18
9	53,95
10	51,25
$X \pm \delta$	$52,00 \pm 2,47$

La Figura 11 presenta una imagen de la sección transversal del grillete de sujeción en la zona oscura de mayor deterioro evidenciada en la inspección visual (Figura 2b), donde se observa el sustrato de acero y el espesor remanente de galvanizado. En la tabla VIII se detalla el espesor del galvanizado, determinado en varios lugares de esta zona.

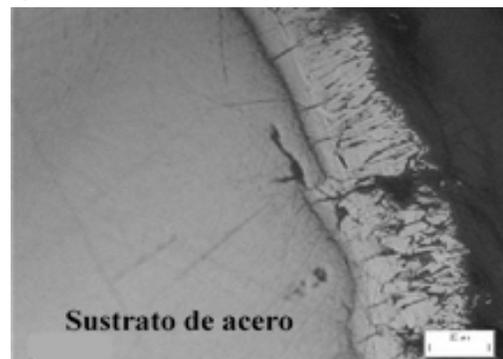


Figura 11: Imagen por microscopía óptica de la sección transversal del recubrimiento del grillete de sujeción en la zona oscura de mayor deterioro evidenciada en la inspección visual (Figura 2b), donde se observa el sustrato de acero y el espesor remanente de galvanizado.

ción transversal del recubrimiento del grillete de sujeción en una zona oscura a 300X y sin ataque químico.

**TABLA. VIII. RESULTADOS DEL ESPESOR REMANENTE EN UNA ZONA OSCURA DEL GRILLETE DE SUJECIÓN.**

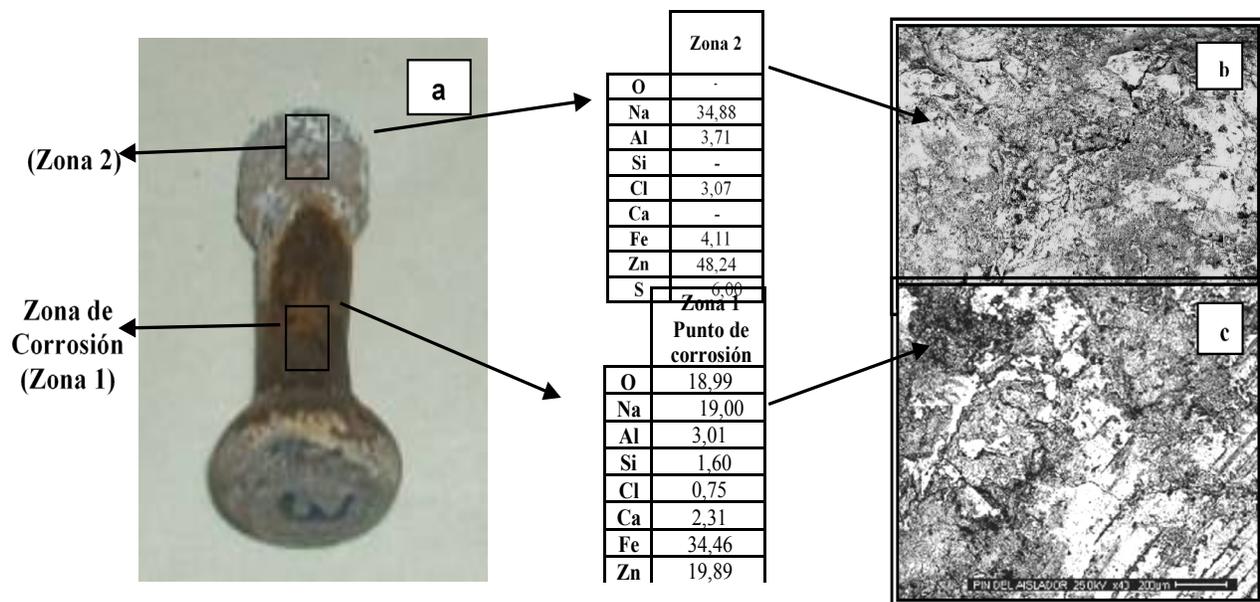
Nº	Espesor (µm)
1	25,00
2	25,89
3	26,79
4	27,68
5	26,78
6	25,67
7	26,35
8	27,10
9	27,37
10	27,38
$X \pm \delta$	$26,60 \pm 0,82$

Nótese que para este caso, el espesor del galvanizado de la zona oscura es de 50% menor con respecto a la zona clara. En ambas zonas el espesor es menor a lo establecido por la Norma ASTM A 153-03 para tornillería, tuercas, pernos y pines, de 71m11.

D. Microscopia electrónica de barrido y microanálisis por energía dispersiva de los componentes evaluados.

#### a) Pin del Aislador

La Figura 12, detalla las zonas evaluadas por MEB y microanálisis por EDX: Zona 1, se observa una fuerte corrosión localizada y la pérdida casi total del galvanizado y la Zona 2 con menos deterioro. La Figura 12b y 12c son imágenes de la superficie del pin del aislador, obtenidas por MEB en modo de electrones retrodispersados. El microanálisis de área por EDX de los depósitos y/o productos de corrosión en la superficie del pin aislador en la zona del punto de corrosión (Zona 1), reveló la presencia de O, Na, Al, Si, Ca, Fe, Zn. Nótese que en esta zona el elemento mayoritario es hierro proveniente del sustrato de acero, lo que indica que el recubrimiento de zinc se ha consumido. Por otra parte el EDX de la zona 2, muestra una composición semi-cuantitativa de Na, Al, Cl, Fe, Zn y S asociados a los contaminantes atmosféricos depositados. Es importante destacar el efecto de la presencia de contaminantes tales como cloro, silicio y azufre, los cuales en conjunto con la humedad aceleran el deterioro corrosivo del galvanizado(1,2). El cloro y el Azufre son contaminantes provenientes de la zona industrial cercana, el silicio proviene de la arena (SiO<sub>2</sub>) del rio cercano a la torre. Adicionalmente bajo ciertas condiciones el deterioro puede incrementarse por vientos que arrastran arena (SiO<sub>2</sub>) y ejercen un efecto erosivo removiendo los productos de corrosión protectores del galvanizado, lo que explica la presencia de silicio y oxígeno en los depósitos.



**Figura 12: (a). Fotografía del pin aislador evaluado. (b) Imagen de la superficie del pin aislador en la zona 1. (c) Imagen de la superficie del pin aislador en la zona 2.**

La Figura 13a, muestra un aspecto general de la sección transversal del pin del aislador donde se observa, la presencia del núcleo de acero y el recubrimiento de galvanizado. La Figura 13b, presenta una imagen obtenida por MEB de la sección transversal en la Zona 2 en modo de electrones retrodispersados. Se presenta el microanálisis EDX de varias zonas identificadas como: (a) núcleo o sustrato de acero, zona A, (b) Recubrimiento zona B, (c) Recubrimiento Zona C. (d) Recubrimiento zona D. Los resultados indican que el núcleo o sustrato del pin está compuesto mayoritariamente de Fe, siendo este de acero. Los EDX de las zonas B y C, evidencian que estas capas del recubrimiento están constituidas por Fe y Zn en diferentes proporciones. El microanálisis por EDX del recubrimiento zona exterior (Zona D) indica que está constituido fundamentalmente por Zinc. Los resultados obtenidos se corresponden con lo esperado para un recubrimiento galvanizado en caliente. El

proceso de galvanizado consiste en sumergir la pieza de acero en un baño de zinc fundido manteniéndolo entre 430 y 460°C. El zinc fundido reacciona con el acero formando capas aleadas Fe-Zn sobre la superficie del material, cada capa contiene progresivamente mayor cantidad de zinc y la capa exterior es 100% zinc. La razón por la cual una capa de zinc protege al acero por largos periodos bajo condiciones atmosféricas agresivas, es debido a los productos de corrosión que se forman. Inicialmente se forman como producto de la reacción entre el aire y el recubrimiento, en ambientes húmedos, hidróxido de zinc, el cual reacciona con el dióxido de carbono para formar el carbonato de zinc el cual es adherente, relativamente insoluble y probablemente responsable de la excelente resistencia a la corrosión y además actúa como barrera protectora del zinc que se encuentra debajo de él (2, 12,13).

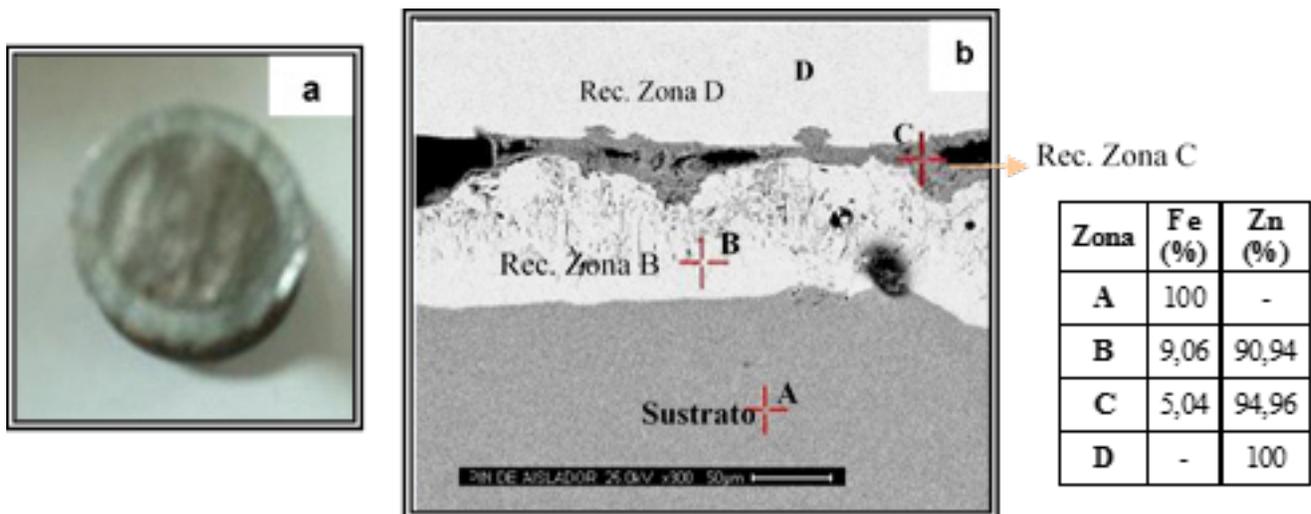
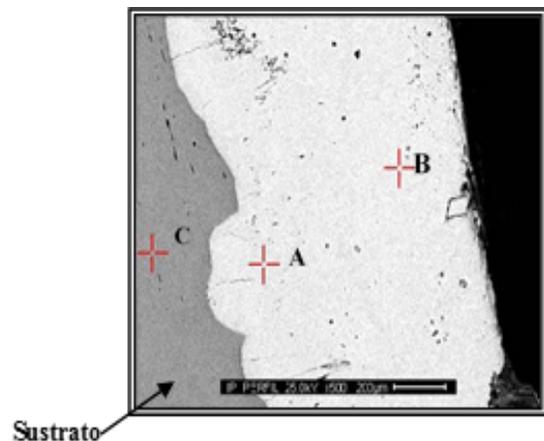


Figura 13: (a) Fotografía de la sección transversal del pin aislador. (b) Imagen de la sección transversal del pin aislador en la condición alejada del punto de corrosión.

#### b) Perfil

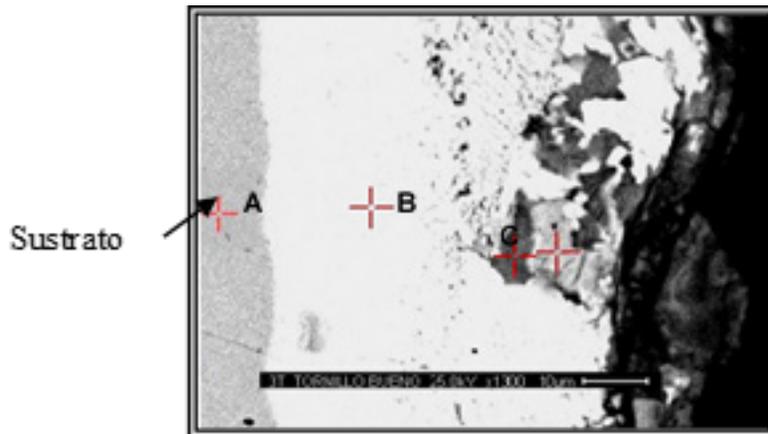
La Figura 14 presenta una imagen por Microscopia electrónica de barrido del espesor remanente del galvanizado en la zona clara evidenciada en la inspección visual (Figura 3 a). Nótese que en esta zona del recubrimiento galvanizado hay dos regiones bien diferenciadas (A y B) cuyo microanálisis por EDX indica que están constituidas por los siguientes elementos: zona A (Fe, Zn) y zona B (Zn, Pb), como se indica en la tabla XI



Zona	Fe (%)	Zn (%)	Pb
A	6,76	93,24	-
B	-	94,30	5,70

**Figura 14: Imagen por MEB de la sección transversal del perfil y microanálisis por EDX**

Los resultados obtenidos, al igual que en el caso del pin del aislador se corresponden con la microestructura característica esperada para un recubrimiento galvanizado en caliente; formando capas aleadas sobre la superficie del acero, donde cada capa contiene progresivamente mayor cantidad de zinc, a medida que nos



	A	B	C
Fe (%)	100	6,78	1,57
Zn (%)	-	93,22	78,77
O (%)	-	-	10,64
Pb (%)	-	-	2,28
S (%)	-	-	1,11
Cl (%)	-	-	5,62

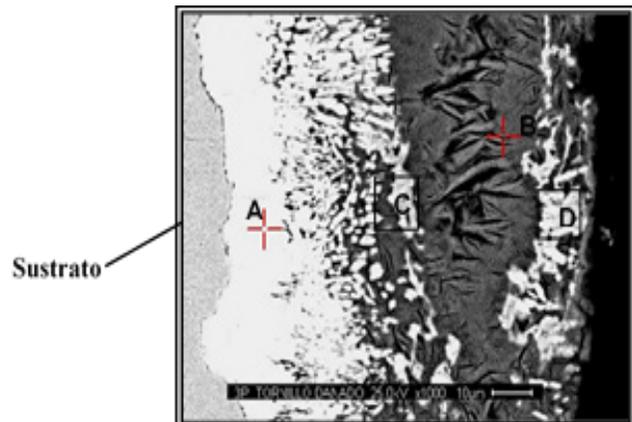
**Figura 15: Imagen por MEB de la sección transversal del tornillo y microanálisis de zonas señaladas.**

En la Figura 16, se detalla una vista de la sección transversal del tornillo en la zona oscura evidenciada en la inspección visual (Figura 2b), donde se observa claramente el espesor remanente de galvanizado y los productos de corrosión formados. Los resultados del microanálisis de las diferentes zonas del recubrimiento identificadas en la Figura 16 destacan la presencia de oxígeno en las zonas B, C, D, asociado a los productos de corrosión y la presencia en la zona más externa del recubrimiento (B y D) de cantidad significativa de azufre en los productos de corrosión formados. Cabe mencionar que en ambientes contaminados como las atmósferas industriales, que es el presente caso debido a la cercanía de estas torres a la zona industrial, hay presencia de gases de azufre, lloviznas o emanaciones corrosivas (haluros, Cl-) liberadas por las industrias cercanas. Los principales contaminantes atmosféricos a considerar son los gases de SO<sub>2</sub> y cloruros. Estos contaminantes aceleran fuertemente el deterioro corrosivo de las estructuras y componentes de la torre.

acercamos al exterior.

### c) Tornillo.

La Figura 15, muestra una imagen por MEB de la sección transversal del tornillo en la zona clara evidenciada en la inspección visual (Figura 2b). El microanálisis de las diferentes zonas en el recubrimiento identificadas en la figura, arrojan los siguientes elementos en los diferentes puntos analizados, destacándose que en la zona C, capa externa del recubrimiento, la presencia de azufre y cloro en cantidades significativas, asociadas a contaminantes ambientales como SO<sub>2</sub> y NaCl provenientes de la zona industrial cercana, como ya se reseñó.



	A	B	C	D
Fe (%)	10,26	-	-	-
Zn (%)	80,24	39,51	67,42	39,51
O (%)	9,5	33,24	32,58	33,24
Pb (%)	-	22,46	-	18,9
S (%)	-	4,79	-	8,35

**Figura 16: Imagen por MEB de la sección transversal del tornillo y microanálisis de zonas señaladas.**

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los componentes metálicos evaluados (pin del aislador, perfil, tornillo y grillete de sujeción) están constituidos por un sustrato de acero, cuyas fases presentes son ferrita y perlita en diferentes proporciones para los distintos componentes metálicos (Ver Figuras 4) y el nivel de inclusiones según la norma ASTM E-45 fueron Silicatos de la serie fina con nivel de  $\frac{1}{2}$  y Óxidos de la serie fina en un nivel de  $\frac{1}{2}$  en todos los componentes. Es importante destacar que en las observaciones realizadas en la inspección visual (Figuras 1, 2 y 3), existe la presencia de dos zonas claramente identificadas por su diferencia de tonalidad, una menos deteriorada (zona clara) y otra con mayor nivel de deterioro (zona oscura), lo que nos indica un deterioro preferencial del recubrimiento. Esto probablemente es consecuencia de la dirección predominante de los vientos que impactan la torre y arrastran los contaminantes y los depositan sobre los componentes de la torre. Los análisis semi-cuantitativos por EDX de los componentes pin del aislador, perfil y tornillo en las zonas claras indican que el recubrimiento galvanizado remanente está constituido por capas de composición variable. Los resultados obtenidos se corresponden con la microestructura característica esperada para un recubrimiento galvanizado en caliente. Durante el proceso de fabricación del recubrimiento, el zinc fundido reacciona con el acero del sustrato, formando capas aleadas (Zn-Fe) sobre la superficie del material, cada capa contiene progresivamente mayor cantidad de zinc a medida que nos alejamos del sustrato al exterior del recubrimiento, siendo la última capa 100% zinc. Adicionalmente como consecuencia de la interacción del recubrimiento con el ambiente, se forman productos de corrosión (2, 12,13).

La determinación del espesor y el microanálisis químico por EDX de las zonas más deterioradas (zonas oscuras) de los componentes metálicos, reflejo que el espesor del galvanizado remanente es notablemente menor que en las zonas claras, indicado un mayor consumo del galvanizado (Fig. 5-11), y formación de productos de corrosión en mayor extensión, los cuales hacen cambiar la apariencia del galvanizado. Todos los resultados de los microanálisis (EDX) realizados a los componentes estudiados, reflejan la presencia de azufre, cloro y silicio como contaminantes mayoritarios, particularmente las evaluaciones realizadas superficialmente al pin del aislador, presente en las zonas estudiadas los elementos O, Na, Si, Ca, Al, Cl, Fe, Zn y S. Todos estos elementos son posiblemente provenientes de la contaminación emanada por las empresas cercanas y las posibles fuentes contaminantes alrededor de las líneas, las cuales aceleran el deterioro corrosivo. En

líneas generales, es importante destacar que el galvanizado es un recubrimiento de tipo ánodo de sacrificio es decir, su función es corroerse y así proteger la pieza recubierta. Los productos de corrosión formados en la superficie del acero galvanizado tienen composición variable dependiendo del ambiente y del tiempo o periodo de exposición. En ambientes contaminados como las atmósferas industriales, como lo es este caso, debido a la cercanía de la torre a una zona industrial (3Km) es de esperar que los principales contaminantes atmosféricos a considerar sean gases de CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, cloruros, y partículas sólidas como arena (cercanía al río). Estos contaminantes aceleran fuertemente el deterioro corrosivo de las estructuras y componentes de la torre. Las condiciones más agresivas de corrosión que se presentan en estas áreas de intensa actividad industrial, se debe a que los contaminantes ya mencionados combinados con la humedad del ambiente mayor al 83 % y con un tiempo de humectación categoría T5 (2), transforman al óxido y/o hidróxido de zinc y el carbonato de Zinc, que son los productos de corrosión esperados, en sulfito y sulfato de zinc, los cuales son solubles por el agua de lluvia quedando la superficie del recubrimiento expuesto al ambiente reiniciándose el ciclo de corrosión, lo que se traduce en una continua pérdida del galvanizado(2,13). Así mismo, los cloruros presentes en el aire también reaccionan con la película protectora de óxido y/o hidróxido de zinc y el carbonato de Zinc produciendo cloruros de zinc solubles, los cuales pueden ser removidos por la lluvia quedando la superficie del zinc expuesta al ambiente corrosivo reiniciándose el ciclo de corrosión(2). Bajo ciertas condiciones la velocidad de corrosión puede ser acelerada por vientos, de magnitud mayor a 6 m/seg, que arrastran arena proveniente de las orillas de las playas de un gran río cercano y de esta forma por efectos erosivos remover los productos de corrosión protectores.

#### V. CONCLUSIONES

\*Los sustratos o núcleos de los diferentes componentes evaluados (pin del aislador, perfil, grillete de sujeción y tornillo) son de acero de medio carbono con una microestructura característica formada por ferrita y perlita.

\*Los componentes metálicos evaluados (pin del aislador, grillete de sujeción, tornillos y perfiles) presentan dos zonas claramente diferenciables en cuanto a tonalidad: una zona clara y la otra oscura, lo que nos indica la presencia de un deterioro preferencial del recubrimiento, asociado a una deposición preferencial de los contaminantes que está relacionado con la dirección predominantes de los vientos. Las mediciones de espesor

remanente de galvanizado y las características de los productos de corrosión formados en los componentes metálicos evaluados (perfil, grillete de sujeción y tornillo), reflejan que las zonas claras se encuentran en mejor estado con respecto a las zonas oscuras.

\*Los microanálisis realizados a los componentes evaluados en las diferentes zonas, reflejan que la pérdida de espesor está asociada a la presencia de los elementos Cl y S como contaminantes predominantes, que forman productos de corrosión solubles en presencia de lluvias que al disolverse generan una continua pérdida de espesor, lo cual se agrava por la dirección de los vientos, los cuales además ejercen un efecto erosivo por el arrastre de arenas (SiO<sub>2</sub>) de las playas de un gran río cercano.

\*La capacidad de protección contra la corrosión del galvanizado en función del espesor remanente, está comprometida dado la agresividad del ambiente industrial de la zona donde está ubicada la torre.

\*Considerando que las líneas de transmisión se encuentran en la cercanía de una gran zona industrial, se trata de una atmósfera industrial con alta concentración de contaminantes, por ello es importante colocar estaciones que permitan monitorear los contaminantes presentes tales como cloruros, dióxido de azufre, CO<sub>2</sub>, sulfatos, sólidos en suspensión y otros, con el fin de determinar el nivel de agresividad del ambiente, donde se encuentran ubicadas las torres. Esto es con la finalidad de poder estimar la vida útil de las estructuras galvanizadas además de sugerir los espesores de recubrimientos más acorde con esta zona y proponer acciones para el mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Centro de Estudios de Corrosión y Biomateriales (CECOB) de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" (UNEXPO)-Vicerrectorado de Puerto Ordaz, Venezuela, por el uso de su equipamiento y el desarrollo de esta investigación, así como al financiamiento por parte del Grupo de Investigación en Caracterización, Procesamiento y Protección de Materiales de la Universidad Estatal de Milagro, para el envío y preparación de las muestras.

## VI. REFERENCIAS

- [1].M. Morcillo, J. Alcántara, I. Díaz, B. Chico, J.Simancas, D. Fuente, "Marine atmospheric corrosion of carbon steels", Revista de Metalurgia, Vol. 44, no 2, pp 045, 2015.
- [2].M. Morcillo, M. Almeida, F. Fragata, Z. Panossian, "Corrosión y Protección de los Metales en Atmosfe-

ras de Iberoamérica", Tomo I, España, Ed. proyecto CYTED, 2002, pp 779.

[3].F. Cadena, L. Irusta b, M.J. Fernandez-Berridib. "Performance evaluation of alkyd coatings for corrosion protection in urban and industrial environments", Progress in Organic Coatings, Vol.76, pp 1273- 1278, 2013

[4].L. Linares, "Evaluación de la corrosividad atmosférica y su efecto en los cables de transmisión eléctrica a 400kV de CVG EDELCA". Tesis de Maestría. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela, 2007.

[5].J. Guerra, A. Castañeda, J. Howland, "Estudio preliminar de la agresividad corrosiva de la atmósfera en el puente de los Caras, Manabí, Ecuador", Revista CENIC Ciencias Químicas, Vol. 47, pp. 17-29, 2016.

[6].D. J. Pazmiño, "Análisis y diseño estructural de una torre de transmisión eléctrica para el proyecto hidroeléctrico Angamarca-Sinde 32MW, Cantón Pangua, provincia de Cotopaxi". Tesis de grado. Universidad Central del Ecuador, Ecuador, 2016.

[7].Norma ISO 1463, 2003, "Metallic and oxide coatings-Measurement of coatings thickness-Microscopical Method", ISO, Genève, Switzerland.

[8].Norma ASTM E 45, 2005, "Standard Test Methods of Determining the Inclusion Content of Steel", ASTM International, West Conshohocken, PA.

[9].Norma ASTM A -36, 2003, "Standard Specification for Carbon Structural Steel", ASTM International, West Conshohocken, PA.

[10].Norma ASTM A 123/A, 2000, "Standard Specification for Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coatings on Iron and Steel Products", ASTM International, West Conshohocken, PA.

[11].Norma ASTM A 153, 2003, "Standard Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware", ASTM International, West Conshohocken, PA.

[12].Y. Rico, E. Carrasquero, "Efecto de la composición química en el comportamiento mecánico de recubrimientos galvanizados por inmersión en caliente: una revisión", Ingenius, N°18, pp. 30-39, 2017.

[13].M. Morcillo, M. Almeida, F. Fragata, Z. Panossian, "Corrosión y Protección de los Metales en Atmosferas de Iberoamérica", Tomo II, España, Ed. proyecto CYTED, 2002, pp 441-494.