



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN
LA CORROSIÓN DE PLACAS Y JUNTAS SOLDADAS A TOPE DE
ACEROS A 36 Y SA-516 GRADO 70”**

Trabajo de titulación

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar el grado académico de:

INGENIERO MECÁNICO

AUTORES: KEVIN ANDERSON LEMA AGUAIZA
CARLOS EFRAÍN REA GAVILÁN

DIRECTOR: Ing. CARLOS OSWALDO SERRANO AGUIAR

Riobamba – Ecuador

2020

©2019, Kevin Anderson Lema Aguaiza y Carlos Efraín Rea Gavilán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Nosotros, Kevin Anderson Lema Aguaiza, y Carlos Efraín Rea Gavilán declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autores asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 06 de febrero de 2020



Kevin Anderson Lema Aguaiza
050315802-4



Carlos Efraín Rea Gavilán
020236184-6

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

El Tribunal del trabajo de titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo: Trabajo Experimental denominado, **ESTUDIO DEL EFECTO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN LA CORROSIÓN DE PLACAS Y JUNTAS SOLDADAS A TOPE DE ACEROS A-36 Y SA-516 GRADO 70**, realizado por los señores: **KEVIN ANDERSON LEMA AGUAIZA y CARLOS EFRAÍN REA GAVILÁN** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		<u>06/02/2020</u>
Ing. Msc. Carlos Oswaldo Serrano Aguiar DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION		<u>06/02/2020</u>
Ing. Msc. Gabriela Cristina Chango Lescano MIEMBRO DE TRIBUNAL		<u>06/02/2020</u>

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico a Dios por brindarme todas las herramientas necesarias para conseguir esta tan anhelada meta en mi vida, por darme la fortaleza para no decaer en los momentos más difíciles y enseñarme que todo sacrificio tiene su recompensa. A mis amados padres, William Lema y Teresa Aguaiza, que con su esfuerzo, trabajo y sacrificio han sido el pilar fundamental y mi ejemplo de lucha y persistencia para poder alcanzar este logro, gracias por los valores que desde la niñez han ido sembrando en mí, además, por su tiempo y amor incondicional. A mis hermanas, Nataly y Geomayra, por su confianza, paciencia y apoyo incondicional, fueron la base primordial para cumplir esta meta, gracias por su compañía y sus palabras en los momentos más difíciles. Y finalmente a mi enamorada Alejandra, gracias por el apoyo incondicional, por los momentos compartidos, por las palabras acertadas en el instante preciso, compartir contigo fue lo mejor del camino, siendo el equipo ideal para alcanzar esta meta.

Kevin Lema

A mis padres Juan Manuel Rea y María Hermelinda Gavilán quienes desde el momento que nací siempre han estado pendiente de mí, mediante sus esfuerzos día tras día me han brindado todo su apoyo moral y económico para así poder culminar mis estudios y poder ser útil para esta sociedad, además obtener dependencia personal para en un futuro no tan lejano devolver todo ese apoyo y el cariño que ellos me han brindado. A mi esposa Rebeca Margoth Peña que siempre ha estado día tras día en las buenas y en las malas a mi lado apoyándome para culminar mis estudios y dando fuerzas para no desmayar en el camino de crecimiento personal y profesional. A mi hija Jhosselyn Mayli quien ha sido mi gran inspiración para seguir luchando por la vida y los sueños que anhelo cumplir, levantarme de cada caída y recordar que mis hijos siguen mis pasos, por ello debo guiar por un buen camino con amor y educación en su vida personal. A mis hermanos Rosa, Vilma y Edwin con quienes hemos compartido momentos de tristeza y momentos de alegría, escuchar de ellos decir, “cuando sea grande quiero seguir la misma carrera que tu”, ha sido una inspiración para no abandonar la carrera a medio camino. A mis tíos quienes día tras día han estado pendiente, apoyándome moralmente y dándome consejos para que los esfuerzos de mis padres no sea un desperdicio, ya que la profesión es la mejor herencia que los padres pueden dar a sus hijos.

Carlos Rea

AGRADECIMIENTO

El más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y a mis maestros de la Carrera de Ingeniería Mecánica por abrirme sus puertas y acogerme para brindarme sus conocimientos para formarme como profesional.

Agradezco de igual manera a los docentes Ing. Carlos Serrano e Ing. Gabriela Chango, quienes formaron parte del desarrollo del trabajo de titulación.

A los ingenieros del Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carroceros, en especial a los Ingenieros Fernando Galarza y Fernando Tibán, Analistas Técnicos de Ensayos e Inspecciones, por brindarme su amistad y conocimientos durante la realización del trabajo de titulación.

Y por último agradezco a mis queridos amigos, Patricio, Juan, Jonatan, Jefferson, Katty, Santiago, los cuales formaron parte de mi vida universitaria, gracias por el apoyo y por sus palabras en los momentos que más los necesite.

Kevin Lema

El más sincero agradecimiento a la ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA Y SUS DOCENTES por formarme como un profesional competente dentro de sus aulas durante la carrera, luchando día tras día por un futuro mejor.

Al Ingeniero Carlos Serrano y la Ingeniera Gabriela Chango por ser parte del trabajo de titulación y la colaboración que han brindado para la elaboración de la tesis durante este periodo, gracias a ellos se ha logrado culminar el trabajo con unos buenos resultados que respalde nuestros esfuerzos y los conocimientos adquiridos durante la carrera.

A mi esposa por tantos momentos felices y por darme un motivo de vida, aliento para levantar de las caídas y seguir luchando día tras día juntos hasta que Dios nos separe.

A mi hija por ser una bendición de Dios y al mismo tiempo ser el motivo más grande por quien tengo que luchar y no darle ventaja a la derrota, seguir luchando día tras día para darle a futuro una vida digna llena de felicidad.

Carlos Rea

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE FICHAS TÉCNICAS.....	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS	vxi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1. Ciencia e ingeniería de los materiales	5
1.1.1. Origen.....	5
1.1.2. Criterios para una adecuada selección de materiales	6
1.2. El acero y su fabricación	7
1.3. Soldadura.....	9
1.3.1. Tipos de soldadura.....	9
1.3.2. Soldadura por arco eléctrico SMAW	10
1.3.3. El electrodo.....	11
1.3.3.1. Designación	11
1.3.3.2. Electrodo 6011	12
1.4. Corrosión	14
1.4.1. Tipos de corrosión	15
1.4.1.1. Corrosión generalizada	16

1.4.1.2. <i>Corrosión localizada</i>	16
1.5. Métodos de protección para la corrosión de aceros	17
1.5.1. Protección catódica	18
1.6. Ensayos de corrosión	23
1.6.1. Pruebas de laboratorio	23
1.6.1.1. <i>Ensayo de niebla Salina</i>	25
1.6.2. Pruebas de servicio	25
1.6.3. Pruebas de campo	26
1.7. Evaluación de la pérdida de masa por corrosión	26

CAPITULO II

2. DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN	28
2.1. Caracterización de los equipos	28
2.2. Identificación de las variables	29
2.3. Tipo y caracterización de ensayo experimental	29
2.4. Materia prima	29
2.5. Procedimiento	31
2.5.1. Inspección y selección de muestras	31
2.5.2. Limpieza de probetas	32
2.5.3. Registro inicial de datos	33
2.5.4. Ubicación de probetas en los soportes	34
2.5.5. Preparación de cámara de niebla salina	36
2.5.5.1. <i>Cálculo del volumen de solución a utilizar</i>	37
2.5.5.2. <i>Cantidad de soluto y solvente</i>	37
2.5.5.3. <i>Preparación de la solución</i>	37
2.5.5.4. <i>Medición del pH de la solución salina</i>	38
2.5.5.5. <i>Ubicación de las probetas en la cámara de niebla Salina</i>	39
2.5.5.6. <i>Parámetros a modificar en la cámara de niebla salina</i>	40
2.5.5.7. <i>Ejecución del ensayo de corrosión acelerada</i>	40
2.5.5.8. <i>Tabulación de datos</i>	41
2.5.6. Cálculos de la tasa de corrosión	43

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	45
3.1. Evaluación de la tasa de corrosión	45

3.2. Fichas de recolección y tabulación de datos.....	47
3.2.1. <i>Acero A-36 placas sin protección catódica.....</i>	<i>48</i>
3.2.2. <i>Acero A-36 placas con protección catódica.....</i>	<i>50</i>
3.2.3. <i>Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>52</i>
3.2.4. <i>Acero A-36 placas soldadas con protección catódica</i>	<i>54</i>
3.2.5. <i>Acero SA-516 grado 70 placas sin protección catódica.....</i>	<i>56</i>
3.2.6. <i>Acero SA-516 grado 70 placas con protección catódica.....</i>	<i>58</i>
3.2.7. <i>Acero SA-516 grado 70 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>60</i>
3.2.8. <i>Acero SA-516 grado 70 placas soldadas con protección catódica</i>	<i>62</i>
3.3. Evaluación de pérdida de masa.....	64
3.3.1. <i>Acero A-36 placas sin protección catódica.....</i>	<i>65</i>
3.3.2. <i>Acero A-36 placas con protección catódica.....</i>	<i>66</i>
3.3.3. <i>Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>67</i>
3.3.4. <i>Acero A-36 placas soldadas con protección catódica</i>	<i>68</i>
3.3.5. <i>Acero SA-516 grado 70 placas sin protección catódica.....</i>	<i>69</i>
3.3.6. <i>Acero SA-516 grado 70 placas con protección catódica.....</i>	<i>70</i>
3.3.7. <i>Acero SA-516 grado 70 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>71</i>
3.3.8. <i>Acero SA-516 grado 70 placas soldadas con protección catódica</i>	<i>72</i>
3.4. Evaluación visual del tipo de corrosión.....	73
3.4.1. <i>Acero A-36 placas sin protección catódica.....</i>	<i>74</i>
3.4.2. <i>Acero A-36 placas con protección catódica.....</i>	<i>75</i>
3.4.3. <i>Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>76</i>
3.4.4. <i>Acero ASTM A-36 placas soldadas con protección catódica.....</i>	<i>77</i>
3.4.5. <i>Acero SA-516 Grado 70 placas sin protección catódica</i>	<i>78</i>
3.4.6. <i>Acero SA-516 Grado 70 placas con protección catódica</i>	<i>79</i>
3.4.7. <i>Acero SA-516 placas soldadas sin protección catódica</i>	<i>80</i>
3.4.8. <i>Acero SA-516 placas soldadas con protección catódica</i>	<i>81</i>
3.5. Comparación del método de protección.....	82
3.5.1. <i>Muestras de acero A-36 placas</i>	<i>82</i>
3.5.2. <i>Muestras de acero A-36 placas soldadas</i>	<i>84</i>
3.5.3. <i>Muestras de acero SA-516 grado 70 placas</i>	<i>86</i>
3.5.4. <i>Muestras de acero SA-516 grado 70 placas soldadas</i>	<i>88</i>
CONCLUSIONES	90
RECOMENDACIONES	92
BIBLIOGRAFÍA	

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Elementos más comunes en la corteza terrestre	6
Tabla 2-1: Clasificación del acero al carbono	8
Tabla 3-1: Clasificación del proceso de soldadura	10
Tabla 4-1: Diferentes tipos de recubrimientos y tipos de corriente	12
Tabla 5-1: Tipos de posiciones para soldar	12
Tabla 6-1: Composición química del electrodo 6011	13
Tabla 7-1: Propiedades de los ánodos de sacrificio	22
Tabla 8-1: Normas ASTM para diferentes ambientes corrosivos	24
Tabla 9-1: Valores y unidades de la constante K	27
Tabla 1-2: Identificación de variables	29
Tabla 2-2: Número de probetas a utilizar	30
Tabla 3-2: Distribución de las probetas a ensayar	32
Tabla 4-2: Codificación de probetas	36
Tabla 5-2: Categoría del material según la resistencia a la corrosión	44
Tabla 1-3: Designación de las probetas	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Relación entre: Ciencias básicas, ciencia de materiales e ingeniería	6
Figura 2-1. Proceso de elaboración del acero	8
Figura 3-1. Soldadura de forja	9
Figura 4-1. Procedimiento de soldadura SMAW	11
Figura 5-1. Corrosión en revestimientos nobles y sacrificiales	18
Figura 6-1. Protección catódica por corriente impresa	20
Figura 7-1. Protección catódica por ánodo de sacrificio en una tubería	21
Figura 1-2. Cámara de niebla salina	29
Figura 2-2. Dimensiones de las placas y juntas soldadas de acero A-36	30
Figura 3-2. Dimensiones placas y juntas soldadas de acero SA-516 grado 70	30
Figura 4-2. Pedazo cilíndrico de aluminio	31
Figura 5-2. Tintas penetrantes colorantes para el acero SA-516 grado 70	31
Figura 6-2. Tintas penetrantes colorantes para el acero A-36	32
Figura 7-2. Limpieza de placas por medio de desengrasantes	33
Figura 8-2. Limpieza mecánica de juntas soldadas	33
Figura 9-2. Calibrador electrónico digital pie de rey digital	34
Figura 10-2. Balanza de precisión electrónica	34
Figura 11-2. Dimensionamiento de la malla de polímero	35
Figura 12-2. Identificación y tiempo de exposición de lotes	35
Figura 13-2. Ubicación de las probetas	35
Figura 14-2. Lote de probetas a ensayar	36
Figura 15-2. Medición de la Masa de sal analítica	38
Figura 16-2. Mezcla del solvente y soluto	38
Figura 17-2. Solución salina recolectada del interior de la cuba	39
Figura 18-2. Medición del pH de la solución recolectada	39
Figura 19-2. Ubicación de las muestras en el interior de la cámara	40
Figura 20-2. Tablero de control de la cámara	40
Figura 21-2. Sello hermético de la cámara de niebla salina	41
Figura 22-2. Limpieza de probetas con agua de red	42
Figura 23-2. Limpieza de probetas con desoxidante	42
Figura 24-2. Placas ensayadas sin y con limpieza	42
Figura 25-2. Secado de placas mediante aire comprimido	43
Figura 26-2. Secado de placas mediante horno eléctrico	43
Figura 1-3. Microscopio estereoscopio OLYMPUS SZ61	46

Figura 2-3. Cámara digital OLYMPUS SC30	46
Figura 3-3. Equipo de iluminación OLYMPUS SC30,.....	46
Figura 4-3. Equipamiento del microscopio estereoscopio y funcionamiento,...	47

ÍNDICE DE FICHAS TÉCNICAS

Ficha Técnica 1: Recolección y tabulación de datos A36PSPC.....	48
Ficha Técnica 2: Recolección y tabulación de datos A36PCPC	50
Ficha Técnica 3: Recolección y tabulación de datos A36PSSPC	52
Ficha Técnica 4: Recolección y tabulación de datos A36PSCPC	54
Ficha Técnica 5: Recolección y tabulación de datos A516PSPC.....	56
Ficha Técnica 6: Recolección y tabulación de datos A516PCPC	58
Ficha Técnica 7: Recolección y tabulación de datos A516PSSPC.....	60
Ficha Técnica 8: Recolección y tabulación de datos A516PSCPC	62
Ficha Técnica 9: Evaluación de pérdida de masa A36PSPC	65
Ficha Técnica 10: Evaluación de pérdida de masa A36PCPC.....	66
Ficha Técnica 11: Evaluación de pérdida de masa A36PSSPC	67
Ficha Técnica 12: Evaluación de pérdida de masa A36PSCPC.....	68
Ficha Técnica 13: Evaluación de pérdida de masa A516PSPC	69
Ficha Técnica 14: Evaluación de pérdida de masa A516PCPC.....	70
Ficha Técnica 15: Evaluación de pérdida de masa A516PSSPC	71
Ficha Técnica 16: Evaluación de pérdida de masa A516PSCPC.....	72
Ficha Técnica 17: Evaluación visual A36PSPC.....	74
Ficha Técnica 18: Evaluación visual A36PCPC	75
Ficha Técnica 19: Evaluación visual A36PSSPC	76
Ficha Técnica 20: Evaluación visual A36PSCPC	77
Ficha Técnica 21: Evaluación visual A516PSPC.....	78
Ficha Técnica 22: Evaluación visual A516PCPC	79
Ficha Técnica 23: Evaluación visual A516PSSPC.....	80
Ficha Técnica 24: Evaluación visual A516PSCPC.....	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-4. Comparación de la tasa de corrosión acero A-36 placas	82
Gráfico 2-4. Comparación de la pérdida de masa acero A-36 placas	83
Gráfico 3-4. Comparación de la tasa de corrosión acero A-36 placas soldadas	84
Gráfico 4-4. Comparación de la pérdida de masa acero A-36 placas soldadas	85
Gráfico 5-4. Comparación de la tasa de corrosión acero SA-516 grado 70 placas	86
Gráfico 6-4. Comparación de la pérdida de masa acero SA-516 grado 70 placas	87
Gráfico 7-4. Comparación de la tasa de corrosión acero SA-516 grado 70 placas soldada	88
Gráfico 8-4. Comparación de la pérdida de masa acero SA-516 grado 70 placas soldadas	89

LISTA DE ABREVIATURAS

NACE	National Association of Corrosion Engineers
ASTM	American Society of Testing Materials
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ESAB	Elektrika Svetsnings Aktiebolaget
AWS	American Welding Society
Ksi	Kilo libras por pulgada cuadrada
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
UV	Ultravioleta
EUA	Administración Federal de Autopistas
PIB	Producto Interno Bruto
ICCP	Protección Catódica por Ánodo de Sacrificio
SACP	Protección por Corriente Impresa
Amp	Amperio
h	Horas
Kg	Kilogramos
g	Gramos

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A:	AGUA DESTILADA TIPO IV
ANEXO B:	SAL ANALÍTICA
ANEXO C:	INFORME DE LA MEDICIÓN DEL PH
ANEXO D:	DESOXIDANTE ERCO
ANEXO E:	INFORME DE CORROSIÓN
ANEXO F:	NORMA ASTM B 117
ANEXO G:	NORMA ASTM G 1
ANEXO H:	NORMA ASTM E 165

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó la implementación del método de protección catódica por ánodos de sacrificio, en placas y juntas soldadas a tope de aceros A-36 y SA-516 grado 70, utilizando el aluminio como ánodo de sacrificio, para de esta manera evitar la formación del fenómeno de la corrosión, a través de un ensayo acelerado en una cámara de niebla salina, la misma que se realizó bajo la norma ASTM B 117. La evaluación de la degradación de la capa superficial del material sufrida por la corrosión, se realizó a través de la norma ASTM G 1, con la finalidad de identificar y cuantificar el daño generado por la corrosión en el ensayo, donde se detectó discontinuidades superficiales producidas por la corrosión tales como: picaduras y erosión, que son el posible resultado del rocío de flujo turbulento de la solución salina utilizada como medio corrosivo, además, que la capa superficial de los materiales presentan microporos que ayudan a incrementar el daño sufrido por la corrosión, ya que es un medio que permite que el fluido corrosivo penetre con mayor facilidad en el material metálico, generando los tipos de corrosión antes mencionados. Como resultado final se obtiene que, al momento de comparar el desempeño de los ocho casos de estudio en cuestión, se puede apreciar que las juntas soldadas de acero SA-516 grado 70 sin protección catódica presentan una mayor debilidad ante la corrosión, mientras que las juntas soldadas de acero A-36 sin protección catódica presentan una mayor pérdida de masa, siendo este último material el menos afectado ante la corrosión. Es de suma importancia realizar un análisis previo de los parámetros a los que estará expuesto el material, para así seleccionar de una manera correcta el ánodo de sacrificio que permita desempeñar la función deseada, para disminuir la tasa de corrosión del material, se debe garantizar un control minucioso de los parámetros modificados en la cámara de niebla salina, tales como: temperatura, caudal, presión y pH (potencial de hidrógeno), para evitar alteraciones en los resultados del ensayo de corrosión, además, es necesario emplear una correcta conexión entre el ánodo de sacrificio y el material que se pretende proteger, garantizando de mejor manera que se produzca la reacción de óxido-reducción entre los materiales metálicos.

Palabras clave: < TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <CORROSIÓN>, <PROTECCIÓN CATÓDICA>, <ÁNODO DE SACRIFICIO>, <TASA DE CORROSIÓN>, <ENSAYO ACELERADO>, <CÁMARA DE NIEBLA SALINA>, <FLUJO TURBULENTO>, <MICROPOROS>.



ABSTRACT

In this titling work, the implementation of the cathodic protection method by sacrificial anodes was carried out, on butt welded joint plates of steels A-36 and SA-516 grade 70, using aluminum as a sacrificial anode, for this way avoid the formation of the phenomenon of corrosion, through an accelerated test in a salt spray chamber, the same one that was carried out under the ASTM B 117 standard. The evaluation of the degradation of the surface layer of the material suffered by corrosion was carried out through the ASTM G 1 standard, in order to identify and quantify the damage generated by the corrosion in the test, where surface discontinuities produced were detected by corrosion such as: pitting and erosion, which are the possible result of the turbulent flow spray of the saline solution used as a corrosive medium, in addition, that the surface layer of the materials have micropores that help increase the damage suffered by corrosion, since it is a means that allows corrosive fluid to penetrate more easily into the metallic material, generating the types of corrosion mentioned above. As a final result, it was obtained that when comparing the performance of the eight case studies in question, it can be seen that the welded joints of SA-516 grade 70 steel without cathodic protection have a greater weakness against corrosion, while the joints A-36 steel welded without cathodic protection show loss of mass, the latter being the least affected by corrosion. It is very important to perform a previous analysis of the parameters to which the material will be exposed, in order to select in a correct way the sacrificial anode that allows to perform the desired function, to decrease the corrosion rate of the material. A thorough control of the modified parameters in the salt spray chamber must be guaranteed, such as: temperature, flow, pressure and pH (hydrogen pressure), to avoid results alterations of the corrosion test, in addition, it is necessary to use a correct connection between the sacrificial anode and the material that is intended to be protected, better guaranteeing that the oxide-reduction reaction occurs between the metallic materials.

Key words: <TECHNOLOGY AND ENGINEERING SCIENCES>, <CORROSION>, <CATHODICAL PROTECTION>, <SACRIFICE ANODE>, <CORROSION RATE>, <ACCELERATED TEST>, <SALT FOG CHAMBER>, <TURBULENT FLOW>, <MICROPORES>.



INTRODUCCIÓN

En este apartado se presenta una reseña histórica de trabajos relacionados con el tema de estudio, así como también, el planteamiento y justificación del problema, además se muestran los objetivos que se desea cumplir con esta investigación.

Antecedentes

Para la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión, NACE por sus siglas en inglés (*National Association of Corrosion Engineers*), la presencia de la corrosión en los materiales por lo general metálicos produce una degradación de la capa superficial del material, lo cual genera una considerable disminución en sus propiedades físicas y químicas, es por este motivo que siempre se ha querido eliminar este fenómeno, pero solo se lo ha podido reducir parcialmente con diversos métodos de protección para conservar al material, razón por la cual, en 1943 con la participación de once ingenieros de la industria de tuberías de gaseoductos se fundó NACE International, la misma que se ha convertido en la organización más importante del mundo en el estudio de la corrosión con la implementación de certificaciones, manuales de control y prevención para la corrosión además de un sin número de publicaciones, como por ejemplo: “*Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications*” (NACE International, 1999), la cual hace referencia a una variedad de normas y técnicas para poder realizar un correcto ensayo de corrosión, teniendo en cuenta diversos parámetros y sus respectivas limitaciones al momento de aplicar y evaluar la corrosión en diferentes medios de exposición.

En Ecuador, se realizó una serie de ensayos sobre corrosión acelerada, uno de ellos en la Escuela Politécnica Nacional, con el nombre “*Ensayos de corrosión metálica en laboratorio y su correlación con ensayos de campo*”. (Mina, 2011), bajo la norma ASTM B117 la cual muestra el procedimiento que se debe seguir para un adecuado ensayo de corrosión acelerada en una cámara de niebla salina, donde se utilizó cuatro materiales metálicos: acero al carbono, acero galvanizado, cobre y aluminio; para observar el comportamiento de la corrosión presente en las muestras en un ambiente salino y en un ambiente industrial similar, siendo el acero al carbono el que más daño sufrió en ambos ambientes corrosivos de estudio.

Un estudio similar se realizó en la Universidad Técnica de Ambato denominado “*Estudio de recubrimientos anticorrosivos aplicados sobre acero A-36 y su incidencia en la tasa de corrosión utilizando la cámara de niebla salina*” (Yépez, 2017), bajo las normas ASTM B117 y ASTM D610, aplicando dos tipos de procesos de recubrimiento; pulverizado y brochado, donde se demostró que la combinación a base de solvente, aplicado por medio de pulverizado, con una limpieza

inicial por chorro abrasivo fue idónea para obtener resultados con valores iguales a cero, con un grado de corrosión casi imperceptible en las muestras de estudio.

Por otra parte, en el estudio denominado: *“Análisis de la tasa de corrosión en la cámara de niebla salina de las juntas soldadas de acero estructural a-36 mediante proceso SMAW con los electrodos de acero al carbono utilizando un recubrimiento anticorrosivo a base de solvente”*. (Villegas, 2019), se analizó bajo las normas ASTM B 117, ASTM D 610 y ASTM G 1, con una duración de 120 horas, y aplicando 18 procesos diferentes, donde los procesos que empleaban una limpieza por medio de lija y grata, más la adición del recubrimiento por medio de brochado resultó ser el mejor método de protección, ya que se obtuvieron valores de corrosión nulos.

De igual manera en otro estudio denominado: *“Diseño del sistema de protección catódica por corrientes impresas para el ducto de GLP desde la estación de bombeo flopec hasta la estación de almacenamiento Monteverde”* (Pacheco, 2012), se tuvo como finalidad proteger un tramo de tubería API 5L X52 de 12 pulgadas de diámetro, que transporta GLP (gas licuado de petróleo), mediante protección catódica por corriente impresa tomando en cuenta factores como: longitud, profundidad enterrada de la tubería, condiciones y características del suelo, ya que este último viene a ser el electrolito del sistema. Aplicando los criterios que impone la norma NACE SP0286 2007. Se alcanzó a proteger una superficie de 180.27 m² aproximadamente, con una cama de 4 ánodos de sacrificio, los cuales fueron diseñados con una vida útil de 10 años.

Otro estudio denominado: *“Diseño del Sistema de Protección Catódica por Ánodos Profundos para un Bosque de Tanques de Almacenamiento de Combustible”* (Suque, 2008), el cual tiene como finalidad evaluar el sistema de protección catódica por ánodos profundos en cinco tanques de almacenamiento de combustible, dicho método de protección resultó ser viable, y con mejor efectividad que los ánodos superficiales, al comparar el costo de instalación se obtuvo un incremento del 11.56 %, en comparación a los ánodos superficiales, pero el método en cuestión obtiene una durabilidad mucho mayor, la cual alcanza una duración de 20 años y resulta más rentable que los ánodos superficiales.

Así mismo, otro estudio denominado: *“diseño de un sistema de protección catódica en líneas enterradas de un tramo del oleoducto secundario Sacha-Lago Agrio”* (Tamayo, 2009), tiene como finalidad proteger un tramo de 8900 m de tubería enterrada que transporta hidrocarburos de la empresa de Petro producción, tomando en cuenta parámetros como: caracterización de suelo a través del análisis de resistividad, porcentaje de humedad, pH y la cantidad de iones disueltos en el mismo. Logrando proteger todo el tramo de tubería con 2 camas de 10 ánodos cada una, dichos ánodos fueron diseñados con una vida útil de 10 años, utilizando el método de corriente impresa

y a la chatarra de hierro como ánodo auxiliar para proteger las tuberías. Este trabajo que lo realizó bajo los parámetros de la norma NACE RP0502-2002 y la norma NACE RPO169-2002.

Planteamiento del problema

A lo largo de la historia se ha intentado reducir parcial o totalmente la corrosión, poniendo la ciencia e ingeniería de los materiales a su disposición, ya sea mediante recubrimientos o protecciones superficiales adicionales al material. Sin embargo, actualmente el fenómeno de la corrosión es considerado el principal factor de formación de problemas en diversas áreas de la industria, debido a la degradación que sufre el material, lo que ocasiona cuantiosas pérdidas económicas en la economía de las industrias.

En Estados Unidos, la Administración Federal de Autopistas (EUA), es una organización que se encarga de monitorear y registrar los daños que causa la corrosión, dicho organismo manifiesta que los costos generados por corrosión en el 2015 ascendieron alrededor de los \$ 500000 millones aproximadamente. Por otro lado, en Ecuador no existe un organismo que registre o monitoree los daños que causa la corrosión en la industria. Razón por la cual, es necesario implementar un organismo que se dedique a recolectar información cualitativa y cuantitativa sobre este fenómeno, para así poder conocer cuánto pierde el país por los daños que causa la corrosión, es fundamental aplicar métodos de protección para el acero que conjuntamente con normas o guías servirán para prevenir los daños por corrosión y de esta manera reducir las pérdidas económicas generadas por este fenómeno.

Existen diversos métodos de protección para contrarrestar a la corrosión, pero sus elevados costos ocasionan que la industria opte por no utilizarlos en algunos casos, debido a que las protecciones pueden llegar a duplicar el costo del proyecto, haciéndolos nada factible ni rentable la utilización de los mismo, es por esto, que se buscan alternativas más económicas para poder proteger a los metales ante la corrosión.

Es de suma importancia investigar el método de protección catódica por ánodo de sacrificio contra el fenómeno de corrosión, para de esta manera fomentar las bases para posteriores investigaciones que surjan en el camino sobre dicho tema, además, este tipo de trabajo servirá como una guía para la preparación, obtención de datos y la posterior evaluación de las probetas de corrosión ensayadas, ante el fenómeno de la corrosión.

Justificación

Mediante la implementación de la protección catódica por ánodo de sacrificio, se busca reducir la tasa de corrosión presente en los materiales expuestos a la intemperie o los que están en servicio, evitando la degradación descontrolada del material, que posteriormente genera pérdidas económicas.

Con la implementación del método de protección antes mencionado se pretende proteger los materiales metálicos de una manera factible y económica durante un determinado tiempo, para disminuir la degradación y tasa de corrosión del material, ya que el ánodo de sacrificio será el que sufra mayor afectación en el sistema.

Para la realización de este trabajo se emplearán normas, teorías y experimentación relacionadas a la protección catódica de elementos metálicos para determinar la pérdida de masa y tasa de corrosión presentes en los materiales de estudio, facilitando así la comprensión del fenómeno de la corrosión al final del ensayo.

Los beneficios de este método de protección están reflejados en la durabilidad y conservación del material, por medio de la disminución de la degradación y la tasa de corrosión del mismo, adicional a esto, se reducirán los costos por mantenimiento, debido a que únicamente hay que sustituir el ánodo de sacrificio para que el sistema de protección siga operando

Objetivos

Objetivo general

Analizar y comparar los efectos de la protección catódica en placas y juntas soldadas a tope de acero A-36 y SA-516 Grado 70.

Objetivos específicos

- Aplicar el método de protección catódica utilizando ánodos de sacrificio para proteger las placas y juntas soldadas, tomando en cuenta parámetros como: tiempo y entorno.
- Analizar el tipo y tasa de corrosión encontrada en las placas y juntas soldadas, para identificar el tipo de corrosión presentes en las muestras.
- Realizar una estadística descriptiva de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta los fundamentos teóricos del presente trabajo, donde se tratan temas como: el proceso de fabricación y origen del acero, la soldadura y sus diversos procesos, el fenómeno y tipos de corrosión, los diferentes tipos de recubrimientos con los que se puede proteger al material ante la corrosión, además se muestra los diversos ensayos de corrosión que se pueden realizar y los parámetros que influyen en el proceso de corrosión, así como sus respectivas normas para desarrollar de una manera correcta los diferentes tipos de ensayos, todo esto se logró a través de una minuciosa revisión bibliográfica.

1.1. Ciencia e ingeniería de los materiales

1.1.1. Origen

Los materiales al igual que el hombre han ido evolucionando a través del tiempo y lo siguen haciendo hasta la actualidad, en la prehistoria el hombre estaba limitado a ocupar los recursos que tenía a disposición en su entorno, por ejemplo; piedras, ramas de árboles, pieles y huesos de animales, surgiendo la necesidad de transformarlos hasta convertirlos en un producto terminado que servirían como armas y vestimenta para la supervivencia, con el pasar de los años los materiales fueron tomando una mayor relevancia en la historia, razón por la cual surgieron etapas fundamentales, que se las conoció como; edad de piedra, edad de cobre o bronce y la edad de hierro, debido a esto nace la ingeniería de los materiales con el objetivo de estudiar la composición, propiedades y estructura, para mejorar sus características, convirtiéndolos en productos que la sociedad necesita, y contribuyendo con la economía y el desarrollo de un país. (Smith y Hashemi, 2006, p. 16)

Smith y Hashemi (2006, p. 20), mencionan que existe una fuerte relación entre las ciencias básicas, la ciencia de los materiales y la ingeniería, como se puede visualizar en la **Figura 1-1**, ya que con la combinación de todas ellas se puede obtener los productos que necesita la sociedad para su desarrollo.

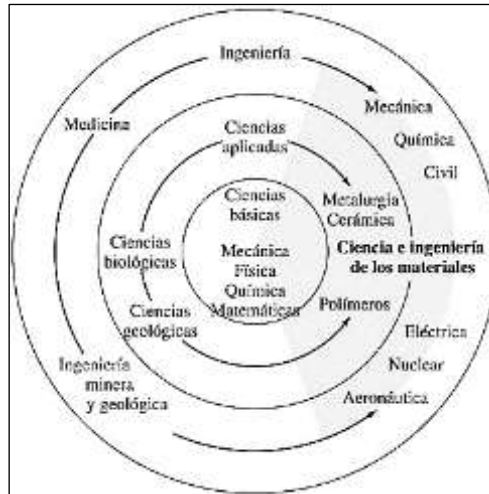


Figura 1-1. Relación entre: Ciencias básicas, ciencia de materiales e ingeniería

Fuente: Smith y Hashemi, 2006, p. 20

1.1.2. Criterios para una adecuada selección de materiales

En vista que existe una diversa variedad de elementos en la corteza terrestre (**Tabla 1-1**), los ingenieros expertos en el estudio y desarrollo de nuevos materiales, logran en laboratorios mejorar las propiedades de los materiales existentes, o a su vez crean unos nuevos dependiendo de la necesidad de su aplicación, ya que debemos tener en cuenta que los materiales en la ingeniería se encuentran en un cambio acelerado y constante, por lo tanto es imposible predecir el uso que le daremos en un futuro debido a que son empleados para la fabricación de una infinidad de productos que empleamos en la vida diaria, es por esto que los ingenieros que realizan los diseños deben tener un conocimiento amplio de materiales para así poder elegir el que mejor se desempeñe al momento de realizar el trabajo para el cual fueron creados. (Smith y Hashemi, 2006, pp. 16-19)

Tabla 1-1: Elementos más comunes en la corteza terrestre

ELEMENTO	PORCENTAJE EN PESO, EN LA CORTEZA TERRESTRE
Oxígeno (O)	46,60
Silicio (Si)	27,72
Aluminio (Al)	8,13
Hierro (Fe)	5,00
Calcio (Ca)	3,63
Sodio (Na)	2,83
Potasio (K)	2,70
Magnesio (Mg)	2,09
TOTAL	98,70

Fuente: Smith y Hashemi, 2006: p. 17

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Callister (1995, pp. 03-04), menciona que existen tres criterios principales que se deben tener en cuenta para realizar una correcta selección del material.

- *Primer criterio*, identificar las condiciones en las que se va a trabajar, con el propósito de determinar las propiedades esenciales con las que debe cumplir el material, es muy inusual que el material cumpla con la combinación perfecta que se necesita para desempeñar el trabajo, es por esto que se debe establecer que propiedades son las más indispensables en comparación a otras.
- *Segundo criterio*, hace referencia a la degradación que sufre el material al estar en servicio, puesto que las condiciones de funcionamiento y el entorno en el que se desenvuelve, tienden a deteriorar las propiedades del material.
- *Tercer criterio*, es el más crucial y relevante, el económico, ya que el material puede llegar a cumplir con la mayor combinación de propiedades posibles, pero si resulta muy caro producirlo no sería rentable su fabricación, debido a esto se debe intentar tener una correcta relación entre propiedad-precio, para que de esta manera se logre conseguir un producto competitivo en el mercado.

1.2. El acero y su fabricación

A la combinación de hierro (Fe) y carbono (C), se le conoce como acero, siempre y cuando este último elemento no exceda del 2% del total de la composición. La manera más empleada para obtener el acero, es por medio de un alto horno (**Figura 2-1**), que es considerado una planta química, debido a que reduce químicamente el óxido de hierro, este horno posee una altura aproximada de 30 metros, en la cual ingresa una mezcla de mineral de hierro, carbón de coque y fundente, para transformarlo en arrabio, además se suele agregar piedra caliza para así eliminar las impurezas del hierro, las mayores ventajas de emplear este método son: bajo costo de producción y alta productividad, es por este motivo que el acero es el material más empleado a nivel mundial, debido a que puede ser manipulado para generar una infinidad de formas que combinada con su excelente durabilidad y bajo costo viene a ser la mejor elección para la construcción. (Biblioteca Digital del ILCE, 2019)

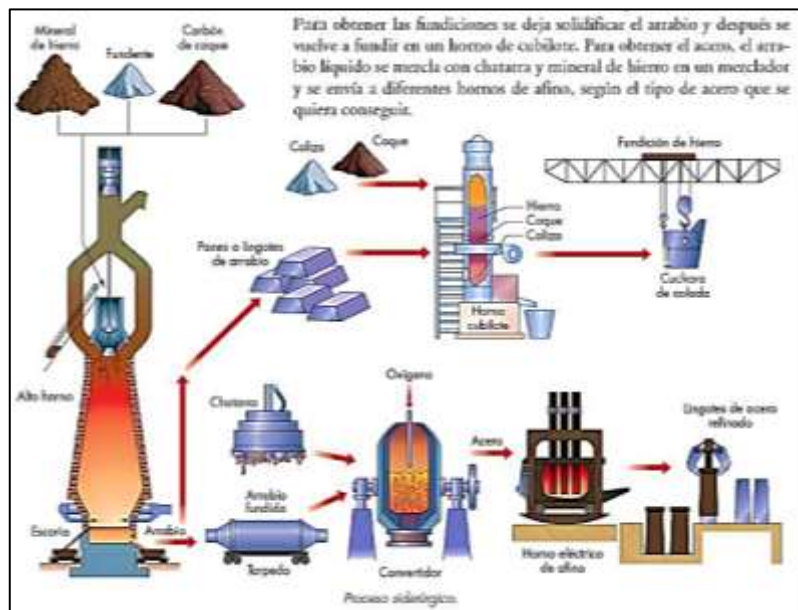


Figura 1-1. Proceso de Elaboración del Acero

Fuente: Quite, A., 2019

Las siguientes propiedades son consideradas de mayor relevancia en los aceros:

- **Resistencia al desgaste:** Fortaleza que ofrece un material al deterioro por fricción con otro material.
- **Tenacidad:** Capacidad que posee un material para absorber la energía de un impacto sin que se produzca una fisura.
- **Maquinabilidad:** Facilidad que tiene un material para ser mecanizado, por medio de arranque de viruta.
- **Dureza:** Resistencia que posee un material para dejarse rayar o penetrar y se la puede cuantificar por la escala BRINELL (HB) o ROCKWEL (HR).

Tabla 1-1: Clasificación del acero al carbono

TIPOS	PORCENTAJE DE CARBONO
Aceros de bajo carbono	0,008% a 0,25%
Aceros de medio carbono	0,25% a 0,60%
Aceros de alto carbono	0,60% a 2,11%

Fuente: Guía y tablas técnicas de los aceros, 2019, p. 17

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Cabe recalcar que los aceros de bajo y medio carbono tienen buenas propiedades de soldabilidad y maquinabilidad.

1.3. Soldadura

El proceso de forjado es considerado el más antiguo para unir metales, se creó en la edad de cobre y hierro hace miles de años; en los continentes europeos y Oriente Medio por la necesidad de fabricar armaduras y armamentos para las batallas, éste proceso consistía en calentar el material en una fragua hasta que éste se encontrara y tomara una forma blanda para posteriormente poder golpear estos materiales entre sí, con la ayuda de un martillo apoyados sobre un yunque, que al enfriarse se obtenía una unión fuerte y estable. (Procesos de Manufactura, 2019)



Figura 3-1. Soldadura de Forja

Fuente: Procesos de Manufactura, 2019

Por lo tanto a la soldadura se la define como el proceso mediante el cual se logra unir dos o más materiales, de igual o diferentes características, con la ayuda de una fuente de calor localizada, por medio o no de un material de aporte llamado electrodo, el proceso se origina al aplicar un tipo de energía ya sea; química, eléctrica o mecánica, para generar un incremento de temperatura en los elementos metálicos, y así lograr derretirlos, provocando un pozo o charco de material fundido, que al enfriarse produce una unión fuerte y sólida, debemos tener en cuenta que el material de aporte debe tener un punto de fusión inferior al de los elementos a unir. (Rodríguez, 2013, p.21)

Giachino y Weeks (1996, p. 01), consideran que debido a su alta eficiencia productiva y bajo costo, actualmente la soldadura es el principal método de unión, ya que se emplea en la mayoría de trabajos de construcción o reparación de elementos metálicos, además aporta una excelente confiabilidad al realizar el proceso de soldadura.

1.3.1. Tipos de soldadura

Schimpke y Hans (1977, pp. 01-02), mencionan que el proceso de soldadura, se clasifica en dos grandes grupos:

- **Soldadura a presión:** Pertenece a la soldadura por resistencia, se produce al unir dos piezas metálicas por medio de un estado pastoso que se genera al realizar una determinada presión.
- **Soldadura por fusión:** Produce un cambio de estado de sólido a líquido por medio de un arco eléctrico que genera una fusión del material a unir, generalmente sin presión y puede o no tener material de aporte.

Love (1981, pp. 24-25) señala que debemos tener en cuenta que la mayoría de juntas soldadas se producen por fusión, razón por la cual debemos considerar el criterio de soldadura fuerte y blanda, éstas nos proporcionan información sobre a qué temperatura se funden los materiales, entonces:

- *Soldadura blanda:* Funde materiales a una temperatura de 427 °C (800 °F) y su mayor aplicación se observa en la soldadura electrónica.
- *Soldadura fuerte:* Se produce con temperaturas mayores a los 427 °C (800 °F) y se aplica a la mayoría de los procesos de soldadura.

En la **Tabla 3-1** se muestra una clasificación de los procesos de soldadura.

Tabla 3-1: Casificación de Procesos de Soldadura

TIPO	PROCESO
Soldadura por Arco (Arc Welding)	Soldadura por arco eléctrico con electrodo de tungsteno y gas protector (GTAW)
	Soldadura por arco eléctrico con electrodo protegido (SMAW)
	Soldadura por arco eléctrico de metal y gas protector (GMAW)
	Soldadura de arco con núcleo fundente (FCAW)
	Soldadura de arco sumergido (SAW)
Soldadura por resistencia	Soldadura de puntos por resistencia (RSW)
	Soldadura de costura por resistencia (RSEW)
	Soldadura de proyección (PW)
Soldadura ultrasónica	Soldadura por fricción (FW)
	Soldadura por fusión
	Soldadura por presión
	Soldadura fuerte
	Soldadura blanda
Soldadura por inducción	Soldadura por forja
Soldadura por electro escoria	Soldadura por explosión

Fuente: LOVE, C., 1981, pp. 24-25

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

1.3.2. Soldadura por arco eléctrico SMAW

La soldadura de arco con metal revestido o SMAW por sus siglas en inglés (*Shielded Metal Arc Welding*), es un proceso que se genera por un arco eléctrico el cual eleva la temperatura del metal base y del metal de aporte (electrodo) a unos 3500 °C aproximadamente, de manera que se produce un charco o pozo de metal fundido que se encuentra cubierta por un gas que genera una atmósfera protectora para evitar la adhesión de impurezas al pozo de soldadura, la solidificación del material ocurre de una manera paulatina con la aparición de escoria que ayuda a que el material no se enfríe de una forma precipitada, si no que vaya enfriándose de acuerdo con el avance del electrodo, debido a esto se encuentra limitada por la longitud del electrodo. Se emplea para soldar

todo tipo de material metálico, la calidad de la unión depende de la habilidad del soldador que realiza el proceso de soldadura. (ESAB, 2019; Flores, 2002)



Figura 4-1. Procedimiento de soldadura SMAW

Fuente: Flores, C.E. 2002, p. 02

1.3.3. El electrodo

Como lo hemos podido observar, para realizar el proceso de soldadura por arco eléctrico es necesario utilizar un electrodo recubierto, en Suecia en 1904, Oscar Kjellberg presentó un electrodo con exceso de flux o revestido, el cual a medida que se fundía generaba una atmósfera de protección aislando a la soldadura con partículas extrañas presentes en el medio ambiente, mejorando de esta manera la calidad de la soldadura. Posteriormente fundó la empresa Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget (ESAB), que en 1905 lanzó a la venta el primer electrodo a nivel mundial, bajo la AWS (*American Welding Society*) que ha normalizado el diseño y su utilización, ESAB es considerada hasta la actualidad como una de las empresas líderes a nivel mundial en el desarrollo de productos de soldadura y sistemas de corte sofisticados. Hoy en día se sigue observando las iniciales OK en los electrodos consumibles en honor a su inventor. (ESAB, 2019)

Éste invento dio excelentes resultados, tanto al ámbito técnico como al económico, ya que ayudó a reducir los costos de producción y disminuyeron sus fallas, además permitió realizar trabajos más eficaces, es por estas razones que es considerado hasta la actualidad el proceso de soldadura más empleado a nivel mundial, por las grandes virtudes que aporta el electrodo revestido. (Flores, 2002, p.02)

1.3.3.1. Designación

Todos los fabricantes a nivel mundial de electrodos, se rigen al sistema de designación del código de la **NORMA AWS A 5.1**, de la *American Welding Society*, para dar a conocer de una mejor manera las especificaciones y aplicaciones de los electrodos para soldadura de aceros al carbono y se lo denomina de la siguiente manera:

E-XXYY

Donde:

E: Electrodo para soldadura por arco.

XX: Resistencia mínima a la tensión en Ksi.

YY: Muestra la posición de soldadura, tipo de recubrimiento y tipo de corriente adecuada para el electrodo.

A continuación, se presenta los diferentes tipos de recubrimientos, de corriente y posiciones de soldadura.

Tabla 4-1: Diferentes Tipos de Recubrimientos y Tipos de Corriente.

DÍGITO	TIPO DE RECUBRIMIENTO	CORRIENTE DE SOLDADURA
0	Sodio de alta celulosa	DC+
1	Potasio de alta celulosa	AC, DC+ o DC-
2	Sodio alto en titanio	AC, DC-
3	Potasio alto en titanio	AC, DC+
4	Polvo de hierro, titanio	AC, DC+ o DC-
5	Sodio bajo en hidrógeno	DC+
6	Potasio bajo en hidrógeno	AC, DC+
7	Óxido alto en hierro. Polvo de hierro	AC, DC+ o DC-
8	Potasio de bajo hidrógeno. Polvo de hierro	AC, DC+ o DC-

Fuente: LINCOLN ELECTRIC, 2019

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Tabla 5-1: Tipos de Posiciones para Soldar

DÍGITO	POSICIÓN
1	Todas las posiciones
2	Horizontal y de piso
3	De piso
4	De piso, sobre cabeza horizontal y vertical

Fuente: West Arc, 2019

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

1.3.3.2. Electrodo 6011

La empresa INDURA produce y comercializa estos electrodos bajo la **NORMA AWS A5.1-91**, formado por un recubrimiento de tipo celulósico potásico, que produce una atmósfera de protección neutra, misma que ayuda a mantener el pozo de soldadura libre de impurezas, al mismo tiempo que produce una escoria que brinda un enfriamiento moderado, su color característico es el blanco con una punta de color azul, se lo puede emplear en cualquier posición para soldar, con corriente alterna o continua, y con polaridad de electrodo positiva. Posee una resistencia a la tensión de 60 Ksi (60000 lb/pulg²). Además, por su composición química (**Tabla 7-2**), son

empleados en aceros con un porcentaje bajo de carbono, es decir para aceros dulces, a continuación, mencionaremos algunas de sus aplicaciones típicas:

- Estructuras
- Cascos de barcos
- Relleno de piezas
- Cañerías de oleoductos
- Reparación generales. (Manual de sistemas y materiales de soldadura INDURA, 2011, pp.30-38)

Tabla 6-1: Composición
Química del
Electrodo 6011

ELEMENTO	PORCENTAJE
Carbono (C)	0,11%
Manganeso (Mn)	0,41%
Silicio (Si)	0,23%
Fósforo (P)	0,01%
Azufre (S)	0,017%

Fuente: Manual de sistemas y materiales
de soldadura INDURA, 2011, pp. 36

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Existe una gran variedad de ambientes y condiciones a las que se deben adaptar los electrodos, debido a esto, existen diversos factores a tomar en cuenta al momento de seleccionar el electrodo más idóneo para desempeñar de la mejor manera el proceso de soldadura. A continuación, se muestran algunos factores que influyen al momento de seleccionar los electrodos:

- Naturaleza del metal base.
- Dimensiones de la sección a soldar.
- Posición para realizar la soldadura.
- Tipo y diseño de la junta a soldar.
- Si el metal de aporte debe cumplir con alguna condición específica especial, como son: gran resistencia a la tracción, resistencia a la corrosión, ductilidad, etc.
- Si la soldadura debe cumplir alguna especificación de alguna norma en especial.

Cumpliendo de una manera correcta los parámetros antes mencionadas, el operario no se va a encontrar con ninguna dificultad al momento de realizar su trabajo, por lo cual tendrá un cordón de soldadura uniforme, con una fácil remoción de la escoria que conllevan al desempeño óptimo del proceso de soldadura. (Manual de sistemas y materiales de soldadura INDURA, 2011, p. 20)

1.4. Corrosión

La corrosión según Alter et al. (2003, p. 13), es la degradación de un material, por lo general metálico, debido al medio ambiente oxidante en el que se encuentra expuesto y puede ser de origen natural, químico o electroquímico, el cual es el causante de generar el desgaste en la superficie del material, provocando una considerable disminución de las propiedades del material, por este motivo es necesario estudiar a la corrosión, pero debemos hacer un mayor énfasis en la velocidad con la que se produce este fenómeno para poder así lograr determinar el promedio de vida que tiene un material en diversos ambientes corrosivos.

La mayoría de los procesos de corrosión se produce por reacciones electroquímicas, que se las conoce como reacciones de óxido/reducción, las cuales ocurren en regiones específicas del material, y se originan por el intercambio de electrones que viajan por el material metálico desde el ánodo hasta el cátodo, con la ayuda de un medio oxidante o también llamado electrolito, siendo el ánodo el que se oxida mientras que el cátodo se reduce. Dicho electrolito es el causante de provocar la reacción de corrosión, ya que conduce electricidad mediante el flujo de iones que van hacia el ánodo y de cationes que se dirigen al cátodo, esto sucede debido a que el electrolito aporta los reactantes necesarios para completar la reacción. El electrolito va a depender de la cantidad de carga que disponga, por ejemplo, al agua de mar se la considera altamente conductiva debido a su alto contenido de iones, mientras que al agua pura se la considera medianamente conductiva por su bajo contenido de iones. (NACE INTERNATIONAL THE CORROSIÓN SOCIETY, 2004, p. 14)

En la obra titulada “Teoría y práctica de la lucha en contra de la corrosión” (González, 1984, p.03), menciona que por la presencia de la corrosión se generan problemas en diversas ramas de la industria debido a que todo lo que nos rodea está constituido por materiales metálicos ya sea como elemento principal o secundario, pero siempre se encuentra presente, por este motivo se producen pérdidas económicas que se clasifican como directas e indirectas; las directas son las que presentan una ruptura parcial o total del material y existe la necesidad de reemplazarlo con un materiales más resistente pero por consecuente más costoso, y las indirectas son los que se generan por la para parcial o temporal debido a factores alternos al material y pueden ser por fallas en la maquinaria, también se generan fallos por corrosión los cuales debemos resolver, supongamos que tenemos el caso de una estructura metálica la cuál presenta daños por corrosión, un problema frecuente y de menor relevancia sería el desgaste de un componente de la estructura, en cambio un problema menos frecuente y catastrófico vendría a ser cuando se produzca el colapso de la estructura y adicional a eso existan pérdidas humanas, éste problema sería el más grave y el que debemos a toda costa evitar, es por esto que surge la necesidad de proteger a los materiales contra el fenómeno de la corrosión para prolongar su vida útil .

Un estudio realizado por la EUA (Administración Federal de Autopistas), en el 2015, manifiesta que el costo generado por corrosión en Estados Unidos de Norteamérica asciende alrededor de los \$ 500000 millones, que viene a representar el 3,1% del PIB (Producto interno Bruto) aproximadamente, se realizó una comparación con los desastres naturales climatológicos, los cuales en el 2011 alcanzaron el valor de \$87000 millones y resultó ser la corrosión seis veces más costoso que los desastres antes mencionados. Los profesionales dedicados al estudio de la corrosión consideran que con la implementación de adecuados sistemas de protección y un correcto mantenimiento preventivo de las estructuras metálicas se lograría reducir un 25% a 30% los costos de daños por corrosión. (Mackay et al., 2016, pp. 36-37)

1.4.1. Tipos de corrosión

Para producir el fenómeno de la corrosión es necesario tener un mecanismo o medio de ataque y este puede ser; químico o electroquímico para que así provoque el deterioro del material metálico, debido a esto actualmente se ha dividido en dos grandes grupos.

- *Corrosión química:* Llamada también corrosión seca, debido a que no existe un electrolito que ayude a la circulación de los iones y electrones para producir el fenómeno de oxidación, razón por la cual éste tipo de corrosión se genera en ambientes gaseosos con altas temperaturas, el proceso se lleva a cabo con la formación de una película sólida en la superficie del material metálico que además interactúa con el medio corrosivo u oxidante ayudando de esta manera a realizar el proceso de oxidación. (Fernández, et al., 2018, p. 01)
- *Corrosión electroquímica:* Llamada también corrosión húmeda, y ocurre por la participación de una solución electrolítica a una temperatura ambiente o un poco superior. En este caso el fenómeno de corrosión se genera en las zonas anódicas del material, mientras que las zonas catódicas se encuentran protegidas debido a que en estas zonas se produce la reducción del medio oxidante, formando de esta manera un circuito electroquímico en el cual los electrones viajan por el metal, partiendo por el ánodo hasta el cátodo, a través del electrolito, el cual cierra el circuito. (Fernández, et al., 2018, p. 02)

En cualquier de los anteriores casos, el fenómeno de la corrosión se presenta como un proceso de degradación heterogéneo, donde su principal característica es que el material metálico se oxide debido a la presencia del medio corrosivo en el que se encuentra. A continuación, se presentan las formas en las que se presenta la corrosión. (Hing, 2010, p. 34)

1.4.1.1. Corrosión generalizada

Este tipo de corrosión se la conoce también como uniforme, por lo general se presenta con mayor frecuencia, su principal característica es que la superficie del material metálico se disuelve en el medio corrosivo en el que está expuesto, provocando una tendencia de corrosión pareja, debido a que las zonas del material se vuelven anódicas y catódicas de una manera intermitente, esto conlleva a una disminución del espesor del material, que posteriormente puede conllevar a su fallo, es posible controlar y evitar este tipo de corrosión con la ayuda de inhibidores de corrosión. (Hing, 2010, p. 34; Fernández, et al., 2018: p. 02)

1.4.1.2. Corrosión localizada

Este tipo de corrosión también se la conoce como no uniforme, se la encuentra con mayor frecuencia y es difícil de controlar, ya que las zonas anódicas y catódicas quedan definidas de una manera concreta y no se alteran con el transcurso del tiempo, es por esto que el fenómeno de corrosión se localiza en regiones específicas del material, destruyendolo de una forma acelerada. (Hing, 2010, pp. 34-35)

Los tipos de corrosión localizada más frecuentes son:

- *Corrosión por picadura (Pitting):* Su principal característica es la formación de agujeros de diámetros pequeños con una determinada profundidad, es considerada la corrosión más destructiva y aparecen en los materiales pasivos (materiales inertes o que no pueden entregar energía), ya que existe una ruptura de la capa pasiva del material (película delgada de óxido formada en la superficie del material) bajo la presencia de iones halógenos (cloruros, yoduros y bromuros) siendo el ion de cloruro el más perjudicial. (Hing, 2010, p. 35)
- *Corrosión galvánica:* Se genera cuando existe el contacto eléctrico de dos o más metales en una misma solución electrolítica, debido a la presencia de un diferencial de potencial que provoca un flujo de corriente entre el metal más noble o pasivo que se polariza como cátodo, el cual disminuye su velocidad de corrosión y el metal más activo que se polariza como ánodo, el cual incrementa la velocidad de corrosión. (Fernández, et al., 2018, p. 02)
- *Corrosión intergranular:* Aparece por la presencia de fisuras o grietas en los límites intergranulares del material, que llegan a ser anódicos mientras que la superficie se convierte en cátodo, además la presencia de impurezas en el metal puede aumentar el efecto de corrosión, la mejor manera de evitar este tipo de corrosión es con un enfriamiento acelerado después de realizar cualquier tipo de tratamiento térmico. (Mackay et al., 2016, p. 41)
- *Corrosión erosiva:* Es causada por la presencia de un ambiente gaseoso o acuoso, el cual se encuentra en la superficie del material en forma de flujo turbulento, ya que choca con el

material, también se puede formar este tipo de corrosión debido a la presencia de sólidos suspendidos en el flujo del fluido y además por condiciones de cavitación. (Yépez, 2017, p. 09)

1.5. Métodos de protección para la corrosión de aceros

Las soluciones a base de metales pueden llegar a ser la mejor alternativa para combatir el fenómeno de la corrosión, pero el costo que conlleva realizarlo no siempre resulta factible, ya que en ocasiones puede llegar a duplicar el costo del proyecto al que se pretende proteger.

Todos los recubrimientos brindan una protección de barrera o una inhibición a la capa superficial del material que se pretende proteger, debemos considerar que el nivel de protección se encuentra limitada a las propiedades que presente el recubrimiento, ya que la mayoría de recubrimientos por no decir todos son permeables ante la presencia de agua y oxígeno, es por esto que existen una gran variedad de métodos de protección para conservar y proteger a los metales del fenómeno de la corrosión, como se muestra a continuación. (Schweitzer, 2010, pp. 198-200)

- *Recubrimientos orgánicos:* La barrera de protección se genera por la presencia de pigmentos orgánicos que se encuentran en el revestimiento que ayuda a disminuir el fenómeno de corrosión, por medio del aumento de la resistencia iónica en la superficie del metal que se obtiene con la aplicación del recubrimiento orgánico, y/o con el aumento de la resistencia eléctrica que se logra al formar una ligera película de óxido entre la superficie del metal y el revestimiento orgánico, dando como resultado un proceso electroquímico en el ciclo de corrosión. (Schweitzer, 2010, pp. 198-200)
- *Recubrimientos metálicos:* La barrera de protección que se genera entre el ambiente corrosivo y el material metálico a proteger tiende a ser poroso en cierto grado, el daño presente por movilidad es la mayor complicación que tiene este tipo de recubrimiento, debido que puede sufrir rasguños o desprendimiento, de la capa protectora, por lo tanto, la acción galvánica presente en la base de un poro o rasguño se convierte en un factor muy importante para determinar el rendimiento y la aplicación de estos recubrimientos. Debemos tener en cuenta que, dentro de estos recubrimientos existe la posibilidad de emplear recubrimientos nobles y sacrificiales, donde los primeros utilizan metales nobles como: níquel, plata, cobre, plomo o cromo, para generar únicamente una protección en forma de barrera, mientras que los otros, además de generar una protección de barrera, se adiciona una protección catódica, los metales más empleados son: zinc, cadmio y en ciertos ambientes también el aluminio y el estaño. Debemos considerar que mientras más grueso es el recubrimiento, más larga será la protección que ofrezca. (Revie y Uhling, 2008: pp. 271-272)

A continuación, se presenta los tipos de recubrimientos metálicos expuestos anteriormente.

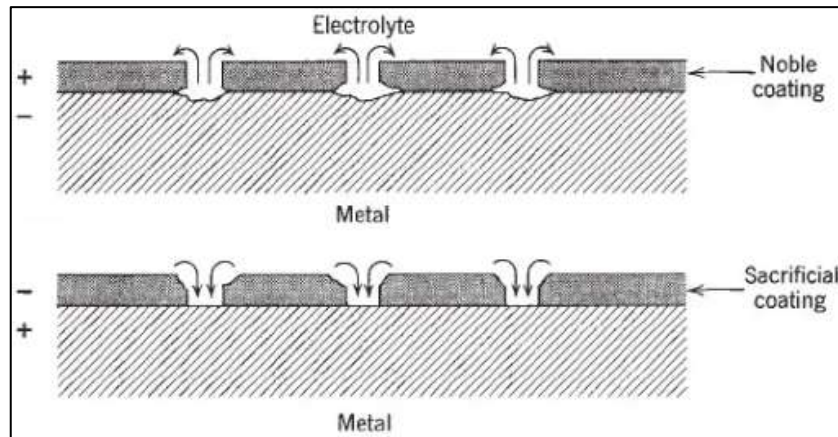


Figura 5-1. Corrosión en revestimientos nobles y sacrificiales.

Fuente: Revie y Uhling, 2008, p. 271

- *Inhibidores:* Los inhibidores forman una película protectora en la superficie del metal, que son adsorbidos por dicha superficie, ya sea por adsorción física o quimisorción. La adsorción física es el resultado de las fuerzas electrostáticas entre los iones orgánicos y la superficie metálica cargada eléctricamente. La quimisorción, es la transferencia o intercambio, de la carga de la molécula inhibidora a la superficie del metal, formando un enlace de tipo coordinado. El inhibidor adsorbido reducirá las velocidades de corrosión de la superficie del metal, de una o ambas de estas reacciones parciales (oxidación anódica del metal y / o reducción catódica del hidrógeno). Los inhibidores pueden usarse en electrolitos a diferentes valores de pH, desde ácido hasta soluciones casi neutras o alcalinas. (Schweitzer, 2010, pp. 309-310)

1.5.1. Protección catódica

Probablemente la protección catódica es considerada una de las formas más importantes de protección contra el fenómeno de la corrosión, puesto que ayudan a eliminar de una manera eficaz algunos tipos de corrosión, por ejemplo, la corrosión por grietas y la corrosión intergranular, llegando a proteger a una gran variedad de materiales metálicos, como: acero, cobre, plomo, latón, etc., este proceso se lleva a cabo por medio de una corriente eléctrica que se aplica de una manera externa hacia el material a proteger, para así reducir la velocidad de corrosión. Cualquier elemento metálico que se encuentre protegido por este método de protección, puede llegar a estar inmerso en diferentes ambientes corrosivos por un indeterminado tiempo. Existen dos tipos de protección catódica: protección catódica por corriente impresa (ICCP) y protección catódica por ánodo de sacrificio (SACP). (Revie y Uhling, 2008: pp. 251-252)

Revie y Uhling (2008: p. 252), hacen referencia que en el año de 1836 y 1837, en Francia e Inglaterra respectivamente, se patentó el revestimiento fundido de zinc por inmersión en láminas de acero,

mejor conocido como galvanizado, que se considera una forma de protección contra la corrosión, pero, también mencionan que aparentemente este procedimiento ya se describió en Francia en el año de 1742.

a) Corriente impresa: Entre 1910 y 1912 en Inglaterra y en los Estados Unidos de Norteamérica, apareció la primera aplicación de la protección catódica por corriente impresa en estructuras subterráneas. Desde entonces, el uso general de la protección catódica se ha extendido rápidamente, y ahora decenas de miles de kilómetros de tuberías y cables enterrados están protegidos contra la corrosión por este método. En muchas partes del mundo, la protección catódica es un requisito establecido por el gobierno que se debe cumplir en oleoductos y gasoductos a alta presión, este método también se aplica a condensadores, submarinos, tanques de agua, estructuras de perforación de petróleo en alta mar, equipos químicos, cubiertas de puentes y otras estructuras de hormigón armado. (Revie y Uhling, 2008: pp. 252-253)

Para que la protección catódica se lleve a cabo es necesaria una fuente de corriente continua y un electrodo auxiliar llamado también ánodo, generalmente suele ser de hierro o grafito y está ubicado a cierta distancia de la estructura protegida. Para la fuente de corriente continua (cc) se suele utilizar un rectificador, para los lugares aislados se emplea generadores de molinos de viento en donde el viento es predominante y confiable, a esta fuente de energía está conectada en su terminal positivo al electrodo auxiliar y su terminal negativa la estructura a proteger; de esta manera, la corriente fluye desde el electrodo a través del electrolito hacia toda la estructura. El voltaje aplicado no es crítico, solo necesita ser suficiente para suministrar una densidad de corriente adecuada a todas las partes de la estructura que se desea proteger. En suelos o aguas de alta resistividad, el voltaje aplicado debe ser mayor al que se usa en los ambientes de baja resistividad. En la Figura 6-2 se muestra un boceto de una tubería enterrada protegida catódicamente. (Revie y Uhling, 2008: pp. 253-254)

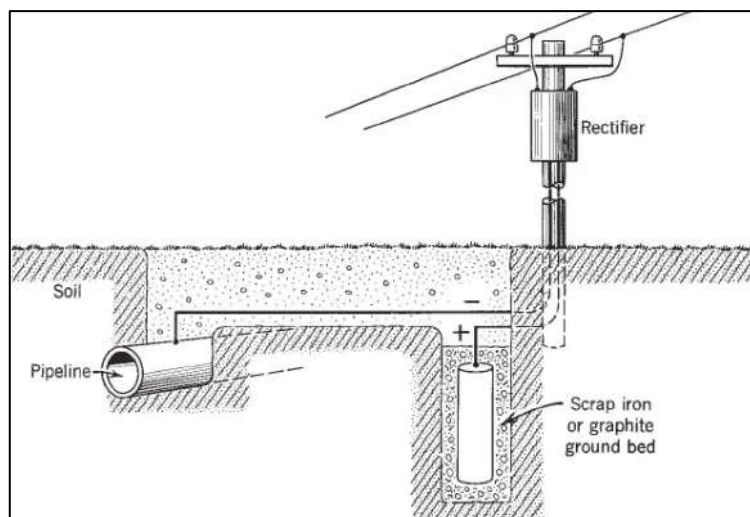


Figura 6-1. Protección catódica por corriente impresa

Fuente: Revie y Uhling, 2008, p. 253

b) Ánodo de sacrificio: Como resultado de experimentos de laboratorio en agua salada, Sir Humphry Davy informó en 1824 que el cobre podría protegerse con éxito contra la corrosión al acoplarlo al hierro o al zinc. Recomendó la protección catódica de los barcos con cubierta de cobre, empleando bloques de hierro para su sacrificio que deberían estar adheridos al casco, con una relación de la superficie de hierro con respecto al cobre de 1:100 aproximadamente. En la práctica, la tasa de corrosión del revestimiento de cobre se redujo considerablemente, como había predicho Davy; pero, desafortunadamente, el cobre protegido catódicamente está sujeto a incrustaciones por organismos marinos, al contrario del comportamiento del cobre desprotegido, que suministra una concentración suficiente de iones de cobre para envenenar organismos incrustantes. Después de la muerte de Davy en 1829, su primo, Edmund Davy (Profesor de Química en la Universidad Real de Dublín), protegió con éxito la herrería de las boyas al unir bloques de zinc, y Robert Mallet, en 1840, produjo una aleación de zinc especialmente para emplearla como ánodo de sacrificio. La protección catódica en la marina no se volvió a explorar hasta el año 1950, por la armada canadiense. Mediante la combinación de pinturas antiincrustantes y pinturas anticorrosivas, se demostró que la protección catódica en los buques era factible y se evidenciaba ahorros considerables en los costos de mantenimiento. (Revie y Uhling, 2008: pp. 254-255)

Debemos tener en cuenta que el ánodo auxiliar está compuesto de un metal más activo en la serie galvánica que el metal que se va a proteger, se establece una celda galvánica con la dirección de la corriente exactamente como se describe en el método anterior, pero en este caso la fuente de corriente o rectificador se puede omitir y el electrodo auxiliar se denomina ánodo de sacrificio, como se muestra en la **Figura 7-1**. Los metales sacrificiales utilizados para la protección catódica consisten en aleaciones a base de magnesio y de aluminio y, en

menor medida de zinc. Los ánodos de sacrificio sirven esencialmente como fuentes de energía eléctrica portátil. Son utilizados cuando no se dispone de una fuente de energía cercana, o en situaciones en las que no es conveniente económicamente instalar líneas de energía eléctrica para ese propósito. La diferencia de potencial de circuito abierto del magnesio con respecto al acero es de aproximadamente 1 V y de 1.3 V en agua de mar, de modo que con un solo ánodo se puede proteger una limitada longitud de material, además la corriente total suministrada por el ánodo es limitada, lo que conlleva a la disminución del peligro de daño por corrientes parásitas (problemas de interferencia) a estructuras metálicas adyacentes. (Revie y Uhling, 2008: pp. 254-255)

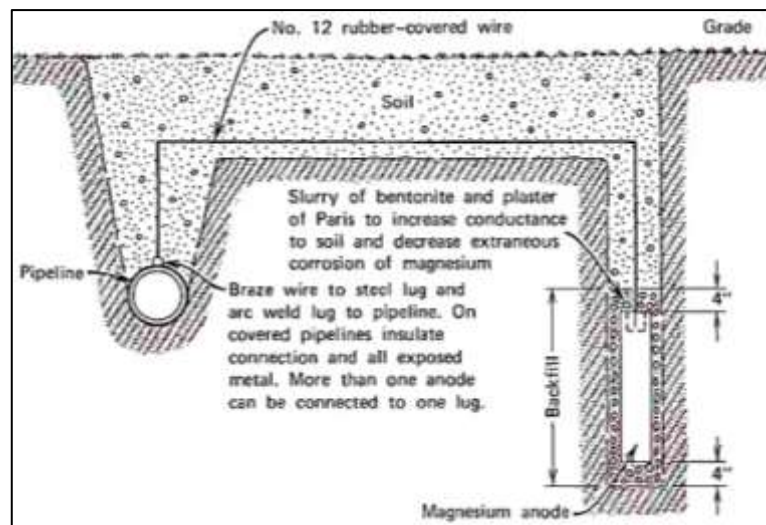


Figura 7-1. Protección catódica por ánodo de sacrificio

Fuente: Revie y Uhling, 2008, p. 254

Los ánodos de sacrificio dependen fundamentalmente de las propiedades electroquímicas, impurezas, y composición química del material, los metales más empleados para ser utilizados como ánodos de sacrificio son: magnesio, zinc, aluminio y la aleación de estos metales también funcionan como ánodo de sacrificio. A continuación, se presentan algunas características de estos ánodos de sacrificio.

- *Ánodos de aluminio:* Son empleados en ambientes marinos, con un elevado pH. el aluminio puro en servicio tiene una capacidad de corriente de 2880 Amp*h/Kg. Por lo general el ataque se puede evidenciar en los bordes de grano y en los límites de los precipitados, debido al diferencial de potencial electroquímico. En algunas aleaciones se generan fisuras y pérdidas de masa del ánodo. La fabricación de este tipo de ánodos es mediante coquilla, y para algunos casos son extruidos cuando se necesita pequeñas cantidades. Las principales ventajas de utilizar el aluminio como ánodo de sacrificio son: baja densidad, bajo peso, mayor capacidad de corriente y costo relativamente bajo. (Revie y Uhling, 2008: p. 257)

- *Ánodos de magnesio*: Presenta un potencial más negativo que el zinc o que el aluminio, presenta una capacidad de corriente de 2200 Amp*h/Kg cuando presenta una disolución divalente y de 1100 Amp*h/Kg cuando es univalente. Se emplean para proteger estructuras metálicas enterradas, no es recomendable utilizarlos en ambientes marinos, debido a que su auto corrosión hace que tenga un bajo rendimiento. (Revie y Uhling, 2008: p. 257)
- *Ánodos de zinc*: Presenta un amplio campo de uso como ánodo de sacrificio, presenta una eficiencia del 95% en ambientes marinos y/o presencia de vegetación, razón por la cual son empleados para proteger los cascos de embarcaciones marinas, condensadores y tanques, pero su capacidad de corriente es demasiado baja para algunas aplicaciones puntuales, debido a la presencia de hierro en la aleación de zinc. El zinc de alta pureza se emplea para eliminar la corrosión intergranular. (Revie y Uhling, 2008: p. 257)

Tabla 7-1: Propiedades de los ánodos de sacrificio

PROPIEDADES	Mg	Zn	Al
Peso atómico (g)	24,32	65,38	26,97
Peso específico a 20°C (g/cm ³)	1,74	7,14	2,70
Punto de fusión (°C)	651	419,4	660,1
Resistividad eléctrica (Ω cm)	4,46*10 ⁻⁶	6,0*10 ⁻⁶	2,62*10 ⁻⁶
Valencia	2	2	3
Equivalente-gramo	12,16	32,69	9,00
Equivalente electroquímico (mg/C)	0,12601	0,3387	0,0931
Capacidad eléctrica teórica (Amp*h/Kg)	2204	820	2982
Capacidad eléctrica teórica (Amp*h/dm ³)	3836	5855	8051
Capacidad eléctrica práctica (Amp*h/Kg)	1322	738	1491
Rendimiento corriente	60	90	50
Consumo teórico (Kg/Amp*Año)	3,98	10,69	2,94
Consumo teórico (dm ³ /Amp*Año)	2,3	1,5	1,1
Potencial normal a 25°C	-2,63	-1,05	-1,93
Potencial de disolución en agua de mar	-1,55	-1,05	-1,85

Fuente: Revie y Uhling, 2008, p. 257

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Para las tuberías enterradas, el costo de la protección catódica es mucho menor que para cualquier otro medio que ofrezca la misma garantía de protección. La garantía de que no se desarrollarán fugas en el lado del suelo de una tubería enterrada protegida catódicamente hace que sea económicamente factible, por ejemplo, transportar petróleo y gas natural a alta presión a través de continentes enteros. Además, la falta de corrosión en el lado del suelo permite especificar el diluyente de tubería de pared adecuada para soportar presiones internas y para evitar cualquier espesor adicional como factor de seguridad contra la corrosión. Este ahorro solo es sustancial. Las compuertas del Canal de Panamá, por ejemplo, están protegidas mediante el uso de corriente

impresa, con un costo inicial de instalación inferior al 0.5% del costo de reemplazar las compuertas. Una ventaja importante es que las compuertas pueden continuar operando sin la necesidad de paradas periódicas largas para reparaciones causadas por la corrosión. Del mismo modo, un barco que está protegido catódicamente puede operar, en principio, durante períodos más largos entre atraque en seco, ahorrando así miles de dólares al año. Las ventajas económicas adicionales, en otros casos, al evitar el agrietamiento por corrosión bajo tensión, la fatiga por corrosión y las picaduras de varios metales estructurales son importantes períodos de vida útil prolongada, mayor confiabilidad y seguridad pública garantizada. (Revie y Uhling, 2008: p. 263)

1.6. Ensayos de corrosión

Antes de realizar cualquier ensayo de corrosión, es necesario tener mucho cuidado con la selección del medio corrosivo y con la preparación de las muestras para nuestro ensayo. Usualmente todos los ensayos de corrosión requieren la presencia de tiempos muy prolongados para obtener resultados, y por lo tanto resultan caros llevarlos a cabo. Debido a esto existen tres pruebas principales para realizar los ensayos de corrosión, las mismas que nos ayudan a reducir tiempos y en ocasiones costos. (Guthrie, et al., 2000, p. 13)

1.6.1. Pruebas de laboratorio

Estas pruebas se lo realizan por medio de un ensayo de corrosión acelerada, que generalmente representa el peor caso en el que puede estar expuesto el material, ya que sufre una corrosión muy agresiva y el daño es difícil de predecir. Por lo tanto, esta prueba no es recomendable para pronosticar la vida o la tasa de corrosión del material de estudio, ya que, al ser una prueba cualitativa, simplemente nos proporciona información que nos ayuda a generar un mejor criterio al momento de seleccionar un material para una aplicación específica. Debemos mencionar que, si el tiempo de exposición es corto, la tasa de corrosión puede ser menor que al emplear un tiempo más prolongado, ya que existen casos en los que la velocidad de corrosión varía con el transcurso del tiempo, debido a la formación de una película de óxido en la capa superficial del material, con lo que puede generarse una aceleración o desaceleración del fenómeno de corrosión. (Guthrie, et al., 2000, p. 13)

Las pruebas de corrosión acelerada, con el transcurso del tiempo se están volviendo más realistas, ya que en la cámara donde se produce el fenómeno de corrosión cada vez se aproxima más al entorno de servicio al que está expuesto el material. Existe una variedad de atmósferas en las cuales se puede realizar el ensayo, debido a esto surge la necesidad de estandarizar los procesos

para los ensayos por medio de normativas como se muestra en la **Tabla 8-1**. (Guthrie, et al., 2000, p. 13)

Tabla 8-1: Normas ASTM para diferentes ambientes corrosivos

AMBIENTES CORROSIVOS	NORMATIVAS
Ambientes de agua dulce	ASTM 39 Standars
Ambientes de agua de mar	ASTM B117
Ambientes generales	ASTM G31

Fuente: Guthrie, et al., 2000, p. 13

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Según Guthrie, et al. (2000, p. 14), para realizar las pruebas de corrosión acelerada existe una dependencia entre el material que se desea analizar, el entorno y el tipo de mecanismo de corrosión. Pero debemos considerar que estos parámetros no presentan ninguna relación directa o exacta con el ambiente de servicio en el que el material se va a desempeñar. Los parámetros más susceptibles a ser modificados son:

- a. *Radiación ultravioleta:* La exposición a los rayos UV o ultravioletas presentan de gran importancia en el deterioro y degradación en la capa de la barrera de los recubrimientos orgánicos, ya que destruye lentamente la columna vertebral polimérica de estos, sin embargo, es posible proteger al recubrimiento de la exposición a los rayos UV con la ayuda de una pintura que no transmita luz, para esto es necesario conocer si nuestro recubrimiento es sensible a la luz o no. Pero en el caso de los materiales sin recubrimientos no juega un papel tan importante, debido a esto es cuestionable la aplicación de rayos UV en una prueba de corrosión acelerada. (Øystein y Forsgren, 2006: pp. 201-202)
- b. *Humedad:* Existe una variedad de opiniones sobre la cantidad correcta de humedad para realizar la prueba de corrosión acelerada, ya que la atmósfera tiende a cambiar de una manera impredecible y drástica de un lugar a otro, a pesar que todo el globo terrestre está compuesto de gases como: nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, debemos considerar que la presencia de oxígeno es casi similar y constante en todo el globo terrestre, pero el vapor de agua contenido en el aire no lo es, ya que varía con la hora del día y mes del año. (Øystein y Forsgren, 2006: p. 202)
- c. *Secado:* Se considera un factor crítico en el proceso de corrosión acelerado, al igual que la humedad, aunque en ocasiones se ignore, ya que la tendencia de aumento de corrosión está relacionada con tener el mayor tiempo posible mojado a la probeta. sin embargo, surgen dos inconvenientes; uno de ellos es que la corrosión avanza de una manera progresiva durante el cambio de húmedo a seco y que en el caso del zinc con una humedad del 100% el fenómeno de corrosión es diferente al que se observa en el campo real. (Øystein y Forsgren, 2006: p. 203)

- d. *Temperatura*: Es una variable crucial en cualquier ensayo de corrosión acelerada, ya que a medida que se eleva la temperatura se obtiene una mayor energía disponible en el sistema, pero esto no significa que se va a alterar la corrosión en la superficie del metal, si no, simplemente la acelera. Cada recubrimiento está diseñado para mantener una película estable en ciertos rangos de temperatura, ya que si se excede este rango es posible que el recubrimiento sufra alguna transformación, cabe mencionar que esto no sucede en condiciones de ambientes naturales. (Øystein y Forsgren, 2006: pp. 206-207)
- e. *Contaminantes*: Usualmente se emplea el término “estrés químico” que hace referencia al contenido de cloruro en una solución, porque los contaminantes presentes en el aire juegan un papel muy importante en el deterioro de un recubrimiento. Algunas experimentaciones realizadas mencionan que el acero al carbono se corroe con una solución al 0.05% de Cloruro de Sodio (NaCl) y que con una concentración del 5% se corroe de una manera más rápida y lo mismo sucede con el acero galvanizado, pero la cantidad de aceleración es muy diferente en ambos casos, ya que el aumento del NaCl tiene un mayor efecto en los sustratos que están cubiertos de zinc, que en los sustratos de acero al carbono. (Øystein y Forsgren, 2006: p. 207)

La mayoría de pruebas aceleradas intentan replicar las condiciones naturales a la que está expuesta el material. A continuación, se presenta el ensayo más empleado para este tipo de pruebas de corrosión acelerada.

1.6.1.1. Ensayo de niebla Salina

Esta prueba se lo realiza en una cuba hermética controlada, durante un cierto período de tiempo, con la finalidad de evaluar el rendimiento que presentan los materiales ante el fenómeno de la corrosión, donde se intenta reproducir el entorno corrosivo que generara el fenómeno de oxidación del material en la vida cotidiana. En 1939 la ASTM adoptó el ensayo de niebla salina, bajo la **NORMA ASTM B 117**, la misma que proporciona información detallada de los pasos y criterios para realizar una correcta prueba de corrosión acelerada, por lo tanto, es considerada una norma estándar para este tipo de pruebas, además, puede ser empleada en una gran variedad de campos industriales, tales como: aeroespacial, aeronáutica, automotriz, y la industria de los recubrimientos, etc.

1.6.2. Pruebas de servicio

Se las denomina así debido a que el material se encuentra en el ambiente de trabajo o de operación, es decir, se está desempeñando la función para la cual fue diseñada. (Guthrie, et al., 2000, p. 13)

1.6.3. Pruebas de campo

Todas las pruebas de corrosión normalmente requieren de tiempos prolongados para obtener resultados, por lo tanto, genera implicaciones grandes en cuanto a costos, debido al tiempo que se debe esperar, razón por la cual, no se emplea con frecuencia estas pruebas, pero debemos considerar que estas pruebas nos proporcionan una información realista y de mayor confianza que otras pruebas de corrosión, ya que se encuentran inmersas en un ambiente corrosivo difícil de replicar. (Guthrie, et al., 2000, p. 13)

1.7. Evaluación de la pérdida de masa por corrosión

La variación de la masa, suministra información cuantitativa, razón por la cual es necesario tener en cuenta la correcta utilización del método de preparación y limpieza final de los productos de corrosión obtenidos en las muestras al culminar el ensayo, para así, eliminar cualquier error al adquirir los datos finales. La variación de la velocidad de corrosión difiere con respecto al tiempo en el cual se desarrolla el ensayo, debido a esto, es de suma importancia establecer correctamente el tiempo que se desea analizar las muestras. Con la finalidad de garantizar los resultados del test se debe tener varias muestras de estudio para realizar las pruebas. (Guthrie, et al., 2000, pp. 14-15)

Para la corrosión generalizada, la tasa de corrosión es proporcional a la pérdida de masa, ya que sufre un adelgazamiento uniforme en todo el material, mientras que para la corrosión localizada no sucede lo mismo, debido a que el daño que sufre el material puede llegar a ser grave sin generar una gran pérdida de masa. Las muestras ensayadas deben ser analizadas meticulosamente antes de realizar la limpieza de los productos de corrosión. (Guthrie, et al., 2000, pp. 14-15)

La **NORMA ASTM G1**, “*Estándar Practice for Preparing, Cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens*”, proporciona los fundamentos y pasos necesarios para realizar una correcta evaluación y limpieza de los productos de corrosión obtenidos luego de realizar la prueba de corrosión acelerada, la unidad más empleada para cuantificar el fenómeno de corrosión son los milímetros sobre año (mm/año) y resulta de la siguiente expresión:

$$\text{Tasa de Corrosión} = \frac{W * K}{A * T * D} \quad (1)$$

Donde:

K= Constante, ver **Tabla 9-1**

T= Tiempo de exposición (Horas)

A= Área (cm²)

W= Pérdida de masa (Gramos)

D=Densidad (g/cm³)

Tabla 9-1: Valores y unidades de la constante K

Unidades	Constante (K)
Mili pulgadas por año (mpy)	3,45x10 ⁶
Pulgadas por año (ipy)	3,45x10 ³
Pulgadas por año (ipm)	2,87x10 ²
Milímetros por año (mm/y)	8,76x10 ⁴
Micrómetros por año (µm/y)	8,76x10 ⁷
Picómetros por segundo (pm/s)	2,87x10 ⁶
Gramos por metro cuadrado por hora (g/m ² h)	1,00x10 ⁴ xD
Miligramos por decímetro cuadrado por día (mdd)	2,4x10 ⁶ xD
Microgramos por metro cuadrado por segundo (µg/m ² s)	2,78x10 ⁶ xD

Fuente: Norma ASTM G1, 2011, p.14

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

CAPITULO II

2. DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

En este apartado se presenta la caracterización de los equipos empleados para el desarrollo del ensayo, además, la variable dependiente e independiente de nuestro estudio y sus variables físicas empleadas para el desarrollo del ensayo de niebla salina, también se muestra la preparación de las probetas a ensayar, así como su limpieza y su posterior evaluación con ensayos no destructivos, así como también la distribución y ubicación de las probetas en la cámara de niebla salina, adicional a esto se muestra el cálculo para la obtención de la solución, así como el cálculo de la tasa de corrosión para los productos resultantes del ensayo. Cabe mencionar que dicho ensayo contempla cuatro etapas las cuales son: preparación, inspección, limpieza de las muestras, y concluye con la evaluación de la tasa de corrosión

2.1. Caracterización de los equipos

La prueba de corrosión acelerada se la realiza en una cuba hermética controlada, como señala el apartado 4 de la norma ASTM B 117. Esta prueba requiere de una composición del 5% de solución de cloruro de sodio, dicha solución se encuentra almacenada en un reservorio plástico con una capacidad de 400 litros, que posteriormente será bombeada al interior de la cámara por medio de una bomba de impulsos y a su vez pulverizada por medio de un compresor externo, generando una niebla salina uniforme en el interior de toda la cámara. Las probetas a ensayar deben tener una limpieza previa a la realización de la prueba, y deben estar suspendidas dentro de la cámara de niebla salina con una inclinación de 15° a 30° con respecto a la vertical, la temperatura de la cuba debe estar alrededor de los $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, y la presión no debe exceder a los 4 bares en su interior, como establece la norma. (ASTM B 117, 2016, p. 08)

En la **Figura 1-2** se muestra la cámara de niebla salina que se encuentra localizada en el Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero de la provincia de Tungurahua, en el cantón Ambato.



Figura 1-2. Cámara de niebla salina

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.2. Identificación de las variables

Tabla 1-2: Identificación de variables

VARIABLE	DESCRIPCIÓN
VARIABLE DEPENDIENTE	Tasa de corrosión
VARIABLE INDEPENDIENTE	La protección catódica en la corrosión de placas y juntas soldadas a tope de aceros A-36 y SA-516 grado 70
TÉRMINO DE RELACIÓN	Efecto

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.3. Tipo y caracterización de ensayo experimental

Causa: Efecto de la protección catódica en la corrosión de placas y juntas soldadas a tope de aceros A 36 y SA-516 grado 70.

Efecto: Evaluación del nivel de corrosión en las placas y juntas soldadas a tope de aceros A 36 y SA-516 grado 70.

Descriptiva: Describir los problemas que ocurren en las probetas antes, durante y al finalizar el ensayo.

Bibliográfica: Se citan documentos de diferentes autores expertos en el tema para tener un mejor criterio de aceptación o rechazo de la evaluación de la tasa de corrosión.

2.4. Materia prima

Los materiales necesarios para desarrollar el ensayo son:

Tabla 2-2: Número de probetas a utilizar

MATERIAL	N° de PLACAS	ESPESOR	CARACTERÍSTICAS
A-36	30	4 mm	Placas. Ver Figura 2-2.
	30	4 mm	Placas soldadas. Ver Figura 2-2.
SA-516 grado 70	30	6 mm	Placas. Ver Figura 3-2.
	30	6 mm	Placas soldadas. Ver Figura 3-2.
Aluminio	60		Pedazos cilíndricos, con diámetro de 1 in y 1,5 in de altura. Ver Figura 4-2.

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

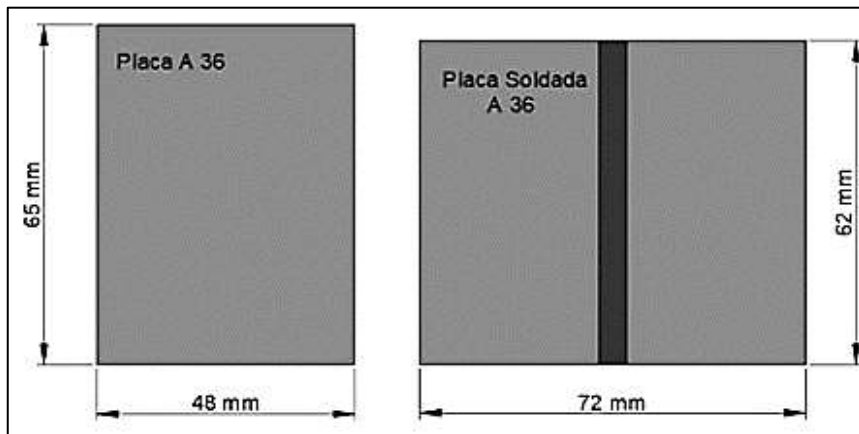


Figura 2-2. Dimensiones de las placas y juntas soldadas de acero A-36

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

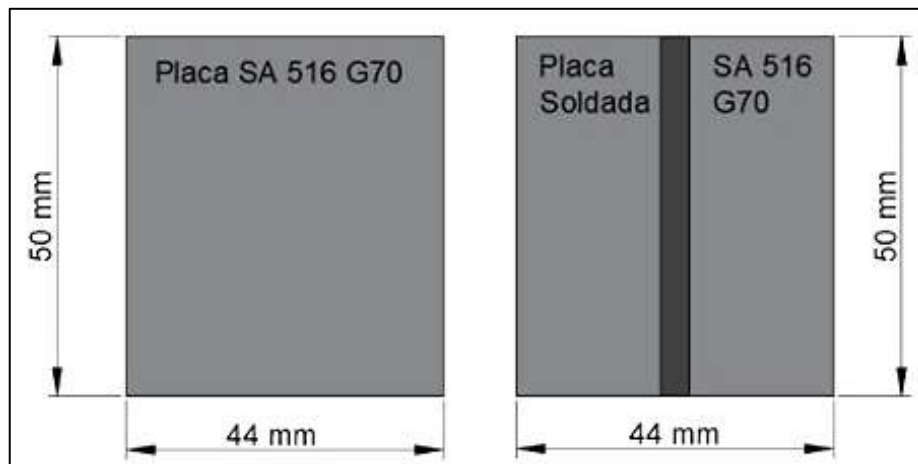


Figura 3-2. Dimensiones placas y juntas soldadas de acero SA-516 grado 70

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 4-2. Pedazo cilíndrico de aluminio

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Las dimensiones de las probetas están realizadas bajo el criterio de los autores, debido a que no existe ninguna norma que establezca el dimensionamiento de probetas.

2.5. Procedimiento

2.5.1. Inspección y selección de muestras

A las placas soldadas se les realizó un ensayo no destructivo por medio de tintas penetrantes colorantes bajo la **NORMA ASTM E 165**, la cual proporciona los pasos y criterios para la correcta inspección y evaluación de las muestras a ensayar, adicional se realizó una inspección visual, para determinar la presencia de discontinuidades externas en los cordones de soldadura. Es necesario seleccionar únicamente las probetas que no presenten discontinuidades externas en los cordones de soldadura y que además cumplan con las dimensiones establecidas anteriormente, caso contrario, serán rechazadas inmediatamente.



Figura 5-2. Tintas penetrantes colorantes para el acero SA-516 grado 70

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

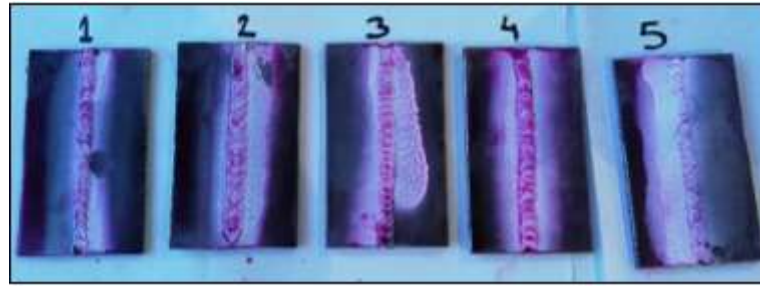


Figura 6-2. Tintas penetrantes colorantes para el acero A-36

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

La finalidad de realizar este ensayo no destructivo, por medio de tintas penetrantes colorantes e inspección visual se garantiza que las probetas a ensayar no presentan discontinuidades que puedan alterar el ensayo de corrosión acelerada de niebla salina. Posterior a esto, se procede a distribuir las probetas en 5 lotes para su fácil identificación, como se muestra en la **Tabla 3-2:**

Tabla 3-2: Distribución de las probetas a ensayar

Grupo	Material	Preparación	Protección	Nº probetas	Probetas por lote
A	A-36	Placas	Sin Protección	3	24
	A-36	Placas	Con Protección	3	
	A-36	Placas Soldadas	Sin Protección	3	
	A-36	Placas Soldadas	Con Protección	3	
	SA-516	Placas	Sin Protección	3	
	SA-516	Placas	Con Protección	3	
	SA-516	Placas Soldadas	Sin Protección	3	
	SA-516	Placas Soldadas	Con Protección	3	
Total	5 grupos a ensayar. (A, B, C, D, E)				120

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.2. Limpieza de probetas

Para el método de lavado inicial de las placas se optó por realizar una limpieza manual mediante un desengrasante, mientras que, en las juntas soldadas se realizó una limpieza mecánica, con la ayuda de una grata, para de esta manera, eliminar cualquier presencia de impurezas tales como: grasas o escorias resultantes del proceso de soldadura, para tener una correcta prueba de corrosión acelerada y evitar que los resultados no se alteren por los motivos antes mencionados.

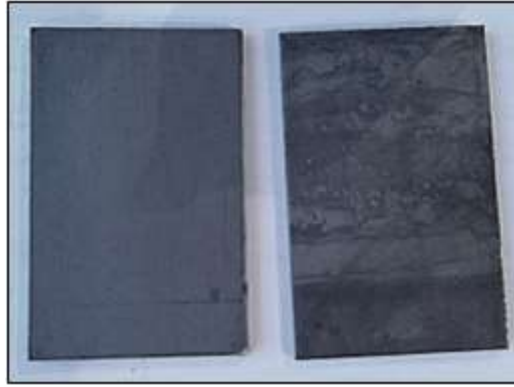


Figura 7-2. Limpieza de placas por medio de desengrasante

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 8-2. Limpieza mecánica de juntas soldadas

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.3. Registro inicial de datos

Realizar la medición y el registro de los parámetros: largo, ancho, espesor, con la utilización de un calibrador electrónico digital pie de rey, que posee una lectura de medición en milímetros y pulgadas en el rango de las centésimas (**Figura 9-2**) y, además, la masa de las probetas, para lo cual se empleó una balanza de precisión electrónica de la marca JADEVER de la serie SNUG III, con una capacidad de 600 gramos y una precisión en la lectura en el orden de las centésimas. (**Figura 10-2**)



Figura 9-2. Calibrador electrónico digital pie de rey digital

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 10-2. Balanza de precisión electrónica

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.4. Ubicación de probetas en los soportes

Las probetas de ensayo deben estar colocadas en soportes que no alteren el desempeño del ensayo, razón por la cual se a obtenido por emplear una malla cuadrículada de material polímero (**Figura 11-2**), hay que tener en cuenta que dicho material es susceptible a la fractura, debido a esto se empleó unos retazos de madera en la parte posterior para lograr rigidizar los soportes y a su vez para poder identificar los diferentes lotes y tiempos de probetas a ensayar (**Figura 12-2**), tener en cuenta que deben ser fáciles de retir luego de cumplir el tiempo de exposición. Las probetas se deben colocar de acuerdo a la **Figura 13-2**, para ser fácilmente identificadas. La codificación de las probetas se muestra en la **Tabla 2-2**. El lote de probetas a ensayar se muestra en la **Figura 14-2**.



Figura 11-2. Dimensionamiento de la malla de polímero

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 12-2. Identificación y tiempo de exposición de lotes

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

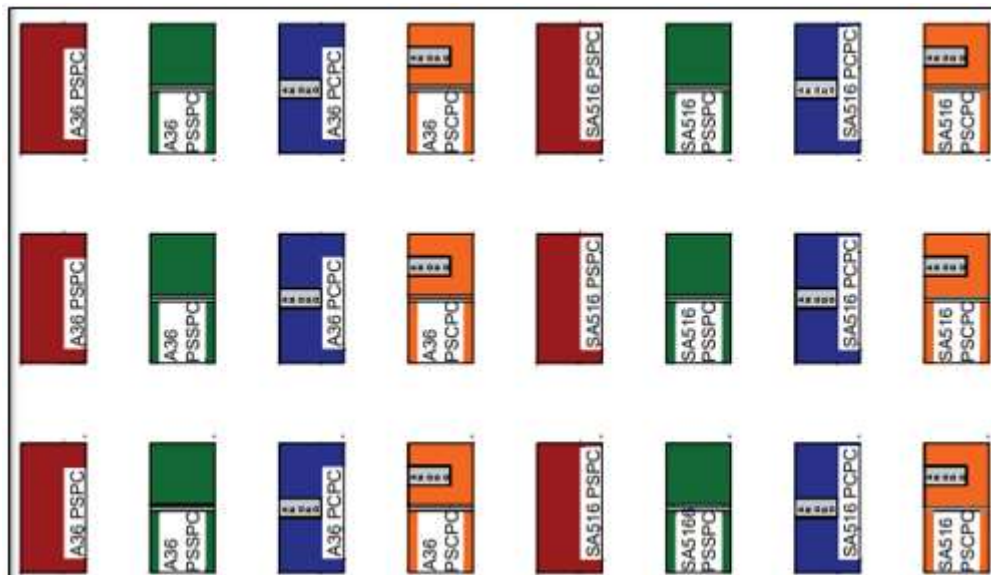


Figura 13-2. Ubicación de las probetas

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Tabla 4-2: Codificación de probetas

Nº	I. del grupo	Proceso Soldadura	Tipo de Limpieza	Recubrimiento	Nº Probetas
1	A36PSPC	Sin Soldadura	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
2	A36PCPC	Sin Soldadura	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
3	A36PSSPC	SMAW - E6011	Mecánica-Grata	Sin recubrimiento	15
4	A36PSCPC	SMAW - E6011	Mecánica-Grata	Sin recubrimiento	15
5	A516PSPC	Sin Soldadura	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
6	A516PCPC	Sin Soldadura	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
7	A516PSSPC	SMAW - E6011	Mecánica - Grata	Sin recubrimiento	15
8	A516PSCPC	SMAW - E6011	Mecánica - Grata	Sin recubrimiento	15
TOTAL					120

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

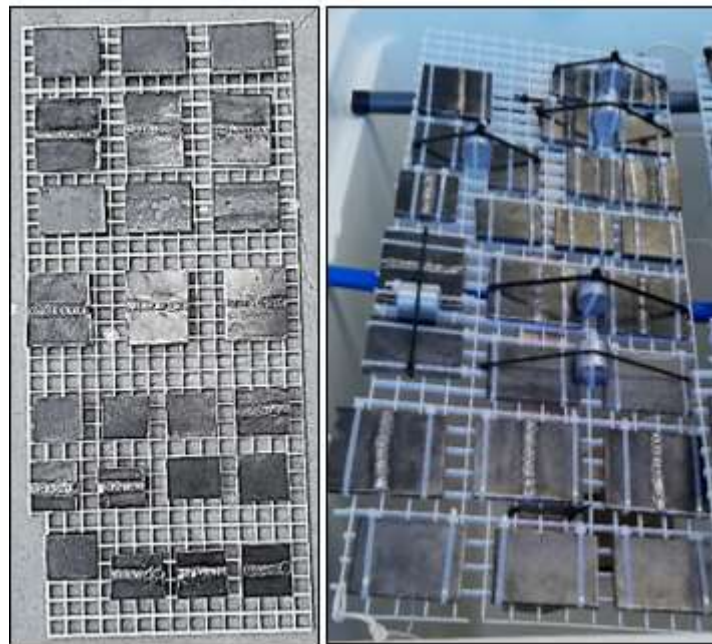


Figura 14-2. Lote de probetas a ensayar

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5. Preparación de cámara de niebla salina

El ensayo de corrosión se llevará a cabo en el “Laboratorio de Ensayos Climáticos y tratamientos Térmicos” del “Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero”, de la provincia de Tungurahua ubicado en el cantón Ambato, el cual proporciona los siguientes pasos a seguir para realizar el ensayo.

2.5.5.1. Cálculo del volumen de solución a utilizar

Estableciendo una duración de 510 horas de ensayo, con un caudal de 0,5 litros/hora, según lo que recomienda el fabricante, el volumen de solución se calcula de la siguiente manera.

$$V_{\text{solución}} = \text{Caudal} * \text{Tiempo} \quad (2)$$

$$V_{\text{solución}} = \left(0,5 \frac{\text{litros}}{\text{hora}}\right) (510 \text{ horas})$$

$$V_{\text{solución}} = 255 \text{ litros}$$

2.5.5.2. Cantidad de soluto y solvente

La norma **ASTM B 117**, en el apartado 8, establece el cálculo de la cantidad de sal analítica requerida en una masa de agua conocida, y además señala que la solución debe estar dada por una composición en masa del 5% de cloruro de sodio, y se la calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Masa de NaCl requerida} = 0,053 * \text{Masa de agua} \quad (3)$$

sabiendo que:

$$1 \text{ litro de agua} = 1 \text{ Kg de agua}$$

Entonces:

$$\text{Masa de NaCl requerida} = 0,053 * \text{Masa de agua}$$

$$\text{Masa de NaCl requerida} = 0,053 * 250 \text{ Kg}$$

$$\text{Masa de NaCl requerida} = 13,25 \text{ Kg}$$

Se debe tener en cuenta que se tiene un volumen muerto de 8 litros debido a la configuración del reservorio. Por lo tanto, para obtener un volumen de 255 litros de solución, se debe mezclar 250 litros de agua tipo IV o agua destilada (**ANEXO A**) y 13,25 Kg de sal analítica (**ANEXO B**), con lo que obtendremos un volumen total de 263,25 litros de solución, que serán suficientes para completar el ensayo.

2.5.5.3. Preparación de la solución

Una vez calculadas las cantidades de soluto y solvente, se procede a realizar la mezcla para obtener la solución, es necesario mezclar de tal manera que la sal analítica se encuentre totalmente disuelta. En la **Figura 15-2** y **Figura 16-2**, se muestra el proceso de preparación de la solución salina.



Figura 15-2. Medición de la masa de sal analítica

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 16-2. Mezcla del solvente y soluto

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5.4. Medición del pH de la solución salina

La norma ASTM B 117, establece que el valor del pH de la solución salina recolectada en el interior de la cuba (**Figura 19-2**) después de ser atomizada a 35 °C (95 °F) debe estar en el rango de 6,5 a 7,2. Además, recomienda que la medición del pH se la debe realizar a una temperatura de 23 ± 3 °C (73 ± 5 °F) utilizando un electrodo de detección de pH adecuado (**Figura 20-2**). La toma de datos del pH se la debe realizar una vez al día como establece la norma.

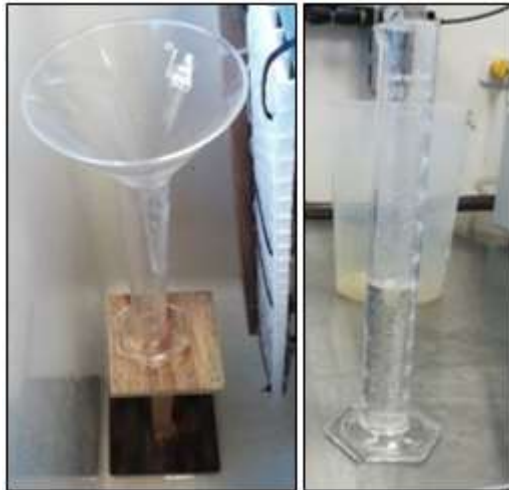


Figura 17-2. Solución salina recolectada del interior de la cuba

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 18-2. Medición del pH de la solución salina

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5.5. Ubicación de las probetas en la cámara de niebla Salina

La **NORMA ASTM B 117**, menciona que las probetas deben tener una inclinación en el rango de los 15° a 30° con respecto a la vertical, se ha optado por una inclinación de 18° para que de esta manera todas las probetas ingresen en la cámara de niebla salina y, además, debe estar de preferencia con la cara expuesta a la dirección del flujo de niebla salina, como se muestra en la **Figura 21-2**.



Figura 19-2. Ubicación de las muestras en el interior de la cámara

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5.6. Parámetros a modificar en la cámara de niebla salina

De acuerdo con la **NORMA ASTM B 117**, en el tablero de control de la cámara de niebla salina se seleccionará los parámetros susceptibles a ser modificados tales como: temperatura ($35\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$), caudal (0,5 litros/hora), presión (1,2 bares) y el tiempo (510 horas). En la **Figura 22-2** se muestra la regulación de dichos parámetros en el tablero de control, cabe recalcar que el valor de temperatura inicia en $22\text{ }^{\circ}\text{C}$, ya que es la temperatura inicial a la que se encuentra el sistema, luego de un corto tiempo alcanza la temperatura deseada de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, debido a que ya se encuentra caliente el interior de la cuba, logrando así mantener la temperatura deseada.



Figura 20-2. Tablero de control de la cámara

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5.7. Ejecución del ensayo de corrosión acelerada

Una vez seleccionados los parámetros para el ensayo en el tablero de control, se procede a realizar el mismo, considerando que se deben realizar controles de medición cada 24 horas del volumen

de solución recolectada y el valor de pH de la misma (**ANEXO C**), teniendo en cuenta que el volumen de solución recolectada por los fluviómetros debe estar en el rango de 24 a 48 ml. Además, tener en cuenta que se deben retirar las probetas en los tiempos de exposición establecidos anteriormente para su posterior evaluación. La cámara de niebla salina debe estar sellada de tal manera que no puedan ingresar ni salir impurezas que alteren el ensayo, y esto se logra con la adición de agua destilada en el canal de la tapa de la cuba, así como se muestra en la **Figura 23-2**.



Figura 21-2. Sello hermético de la cámara de niebla salina

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

2.5.5.8. Tabulación de datos

Luego de extraer los grupos de probetas ensayadas de la cámara de niebla salina, se las deben lavar con agua (destilada o de red) para remover la sal presente en las probetas (**Figura 24-2**), para luego limpiar el óxido presente con la ayuda de un desoxidante orgánico de la marca ERCO Clinox (**ANEXO D**) y un cepillo de cerdas suaves (cepillo de dientes) como se muestra en la **Figura 25-2**, posteriormente se realiza un secado por medio de aire comprimido como se muestra en la **Figura 27-2**, finalmente se colocan las probetas en el horno (**Figura 28-2**) a una temperatura de 40°C, por unos 20 minutos para eliminar la presencia de agua en las probetas. Una vez secas las probetas, se procede a medir y a registrar los datos de masa, para realizar el respectivo cálculo de tasa de corrosión.



Figura 22-2. Limpieza de probetas con agua de red

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 23-2. Limpieza de probetas con desoxidante

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 24-2. Placas ensayadas sin y con limpieza

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 25-2. Secado de placas mediante aire comprimido

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 26-2. Secado de placas mediante horno eléctrico

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Cada vez que cumplan con el tiempo establecido de ensayo y se retiren las probetas de la cámara de niebla salina se debe realizar el mismo procedimiento antes mencionado con todos los diferentes grupos de probetas ensayadas.

2.5.6. Cálculos de la tasa de corrosión

De acuerdo con lo establecido en la norma **ASTM G 1**, se procederá a determinar la tasa de corrosión presentes en las probetas de estudio, mediante la siguiente expresión:

$$\text{Tasa de Corrosión} = \frac{K * W}{A * T * D} \quad (4)$$

Donde:

K= Constante, ver **Tabla 9-1**

T= Tiempo de exposición (Horas)

A= Área (cm²)

W= Pérdida de masa (Gramos)

D=Densidad (g/cm³)

$$Tasa\ de\ Corrosi3n = \frac{(87600)(3,63\ g)}{(32,03\ cm^2)(510\ horas)\left(7,81\ \frac{g}{cm^3}\right)}$$

$$Tasa\ de\ Corrosi3n = 2,493\ \frac{mm}{a\~no}$$

Se tomaron los valores del ítem N° 13 de la **Ficha Técnica 1**, para calcular la tasa de corrosión presente en la probeta, los demás ítems están calculados mediante una hoja de Excel.

Tabla 5-2: Categoría del material según la resistencia a la corrosión

RESISTENCIA A LA CORROSI3N	mm/año
Sobresaliente	<0,02
Muy buena	0,02-0,1
Buena	0,1-0,5
Regular	0,5-1
Mala	1-5
Inaceptable	>5

Realizado por: Autores, 2019

Fuente: Fernández, 2018

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este apartado se presenta la designación, significado y número de probetas necesarias para el desarrollo del ensayo, así como la caracterización de los equipos empleados para la evaluación de los productos resultantes del ensayo acelerado de niebla salina, además, se muestra la codificación de las probetas para cada grupo de estudio, y además, la obtención de la tasa de corrosión con la ayuda de una hoja de cálculo de Excel.

Cabe mencionar que para cada grupo de estudio existe una ficha específica donde se puede evidenciar los parámetros tomados en cuenta para el correcto desarrollo del ensayo acelerado de niebla salina.

3.1. Evaluación de la tasa de corrosión

Con los datos obtenidos se procede al cálculo de la tasa de corrosión, para comparar la efectividad del método de protección catódica por ánodo de sacrificio. Los cálculos de las fichas técnicas están codificados como lo indica la **Tabla 1-3**.

Tabla 1-3: Designación de las probetas

Nº	DESIGNACIÓN	SIGNIFICADO	Nº PROBETAS
1	A36PSPC	Acero A-36 Placas Sin Protección Catódica	15
2	A36PCPC	Acero A-36 Placas Con Protección Catódica	15
3	A36PSSPC	Acero A-36 Placas Soldadas Sin Protección Catódica	15
4	A36PSCPC	Acero A-36 Placas Soldadas Con Protección Catódica	15
5	A516PSPC	Acero SA-516 Placas Sin Protección Catódica	15
6	A516PCPC	Acero SA-516 Placas Con Protección Catódica	15
7	A516PSSPC	Acero SA-516 Placas Soldadas Sin Protección Catódica	15
8	A516PSCPC	Acero SA-516 Placas Soldadas Con Protección Catódica	15
TOTAL			120

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

Para la evaluación visual del tipo de corrosión se utilizó un microscopio estereoscópico OLYMPUS SZ61 (**Figura 1-3**), para realizar las fotos de la macrografía de las probetas ensayadas se empleó una cámara digital OLYMPUS SC30 (**Figura 2-3**), que posee una resolución de 3,3 megapíxeles, adicional a esto se usó el equipo OLYMPUS HIGHLIGHT 3100 (**Figura 3-3**), para

brindar una mejor iluminación al momento de visualizar y fotografiar las probetas en el microscopio.



Figura 1-3. Microscopio estereoscópico
OLYMPUS SZ61

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 2-3. Cámara digital OLYMPUS
SC30

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019



Figura 3-3. Equipo de iluminación OLYMPUS SC30

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En la **Figura 4-3**, se puede evidenciar la totalidad del equipo y su funcionamiento.



Figura 4-3. Equipamiento del microscopio estereoscópico y funcionamiento

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.2. Fichas de recolección y tabulación de datos

En las siguientes fichas expuestas se muestra los parámetros tomados en cuenta para realizar la correcta evaluación del ensayo de niebla salina, tales como: lugar, ciudad, fecha, tipo de máquina empleada, norma utilizada para el desarrollo del ensayo, tipo y densidad del material, así como su limpieza superficial, además se especifica el tipo de electrodo y método utilizado para la soldadura de ser el caso, al igual que sus dimensiones longitudinales, el tiempo de exposición de las muestras, como también la masa inicial y final, asimismo el valor de la constante para el cálculo de la tasa de corrosión que posteriormente servirán para realiza la construcción de una gráfica que representa los niveles de corrosión en función al tiempo que duró el ensayo. Por último, se registran las observaciones más relevantes que resultan al finalizar el ensayo, así como el criterio con el que se realizó las gráficas.

Cabe mencionar que dicho ensayo contempla cuatro etapas las cuales son: preparación, inspección, limpieza de las muestras, y concluye con la evaluación de la tasa de corrosión, la cual se desarrolló con la ayuda de la **NORMA ASTM G1**.

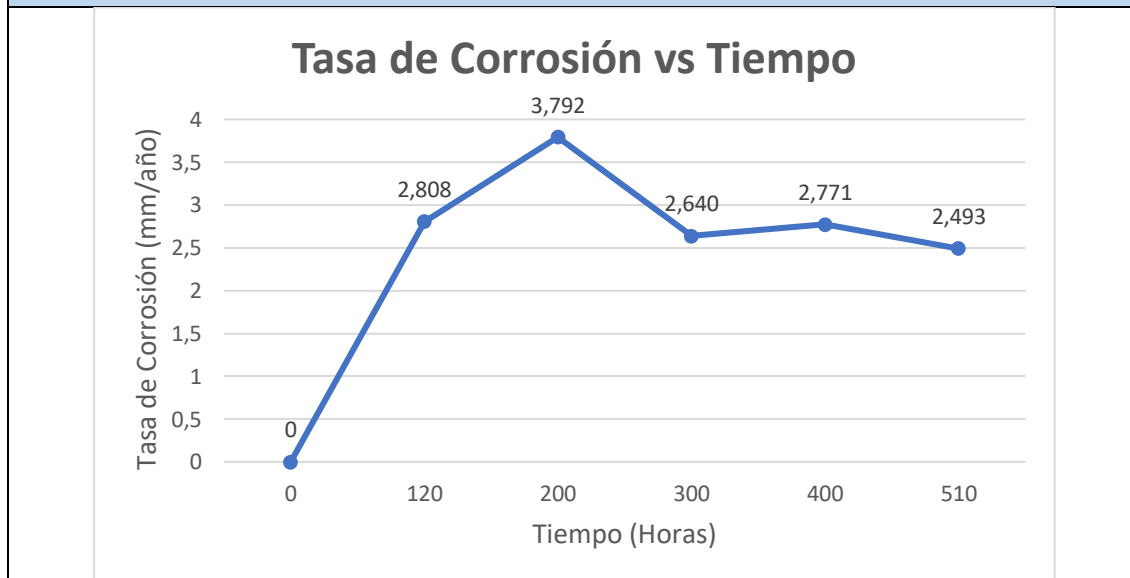
3.2.1. Acero A-36 placas sin protección catódica

Ficha Técnica 1: Recolección y tabulación de datos A36PSPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Máquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:		A36PSPC				
Norma:	ASTM B 117	Material:		A-36				
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:		7,81 g/cm ³				
Limpieza:	Manual-Desengrasante	Constante K:		87600				
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
N°	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	65,38	47,83	31,27	96,22	95,39	0,83	2,481
2	120	65,35	49,22	32,17	98,38	97,52	0,86	2,499
3	120	65,31	49,57	32,37	99,25	98,34	0,91	2,627
4	200	65,25	47,00	30,67	94,25	91,96	2,29	4,188
5	200	65,58	49,66	32,57	100	97,80	2,20	3,789
6	200	65,57	48,36	31,71	96,75	94,82	1,93	3,413
7	300	65,15	48,73	31,75	97,13	94,98	2,15	2,532
8	300	65,25	49,84	32,52	99,9	97,61	2,29	2,633
9	300	66,42	47,90	31,82	96,41	94,14	2,27	2,668
10	400	66,42	48,43	32,17	98,11	94,80	3,31	2,885
11	400	65,42	49,28	32,24	99,07	95,76	3,31	2,879
12	400	65,43	49,25	32,22	98,29	95,36	2,93	2,550
13	510	65,62	48,81	32,03	98,27	94,64	3,63	2,493
14	510	65,59	48,72	31,96	97,39	93,77	3,62	2,491
15	510	65,42	49,60	32,45	99,03	95,35	3,68	2,494

VALORES PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	65,35	48,87	31,94	97,95	97,08	0,867	2,808
2	200	65,47	48,34	31,65	97,00	94,86	2,140	3,792
3	300	65,61	48,82	32,03	97,81	95,58	2,237	2,640
4	400	65,76	48,99	32,21	98,49	95,31	3,183	2,771
5	510	65,54	49,04	32,14	98,23	94,59	3,643	2,493

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, al transcurrir las 510 horas se obtiene una disminución del espesor de 1,25 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR:	Kevin Lema / Carlos Rea
REVISADO POR:	Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

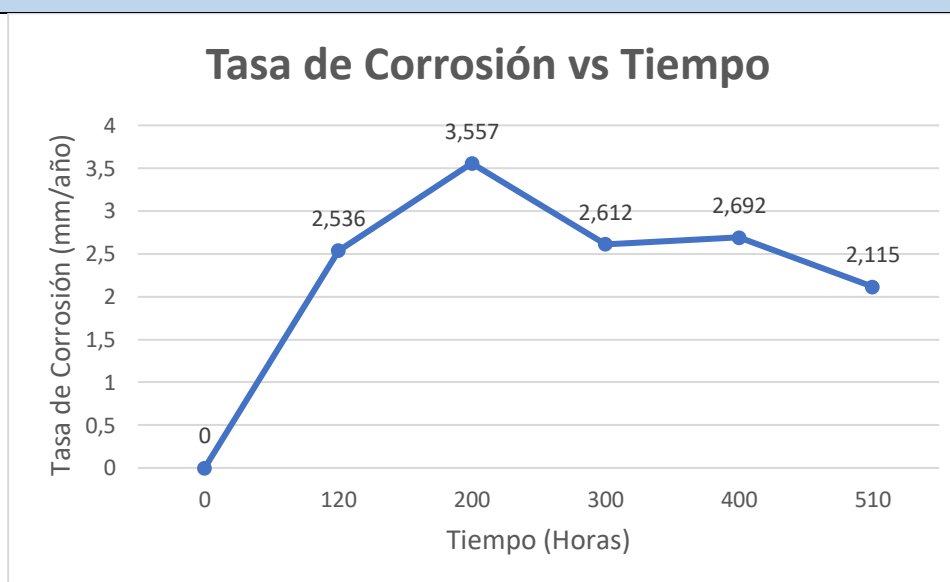
3.2.2. Acero A-36 placas con protección catódica

Ficha Técnica 2: Recolección y tabulación de datos A36PCPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:	A36PCPC					
Norma:	ASTM B 117	Material:	A-36					
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,81 g/cm ³					
Limpieza:	Manual-Desengrasante	Constante K:	87600					
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	65,31	49,78	32,51	95,81	94,76	1,05	3,019
2	120	65,57	49,47	32,44	98,59	97,76	0,83	2,392
3	120	65,61	47,14	30,93	94,45	93,45	1,00	3,022
4	200	65,08	47,94	31,20	96,28	94,29	1,99	3,577
5	200	65,16	50,56	32,94	100,86	98,79	2,07	3,524
6	200	66,38	49,93	33,14	101,48	99,37	2,11	3,570
7	300	66,45	47,86	31,80	96,51	94,36	2,15	2,528
8	300	66,35	47,72	31,66	95,82	93,79	2,03	2,397
9	300	66,35	50,47	33,49	102,41	99,71	2,70	3,015
10	400	65,97	46,86	30,91	95,11	92,03	3,08	2,794
11	400	65,47	45,88	30,04	92,49	89,52	2,97	2,773
12	400	66,20	50,80	33,63	103,05	100,02	3,03	2,526
13	510	65,48	51,21	33,53	102,32	99,19	3,13	2,053
14	510	66,29	48,27	32,00	97,56	94,41	3,15	2,165
15	510	66,22	49,57	32,83	99,67	96,49	3,18	2,131

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	65,50	48,80	31,96	96,28	95,32	0,960	2,536
2	200	65,54	49,48	32,43	99,54	97,48	2,057	3,557
3	300	66,38	48,68	32,32	98,25	95,95	2,293	2,612
4	400	65,88	47,85	31,52	96,88	93,86	3,027	2,692
5	510	66,00	49,68	32,79	99,85	96,70	3,153	2,115

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, al transcurrir las 510 horas se obtiene una disminución del espesor de 0,94 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR:	Kevin Lema / Carlos Rea
REVISADO POR:	Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

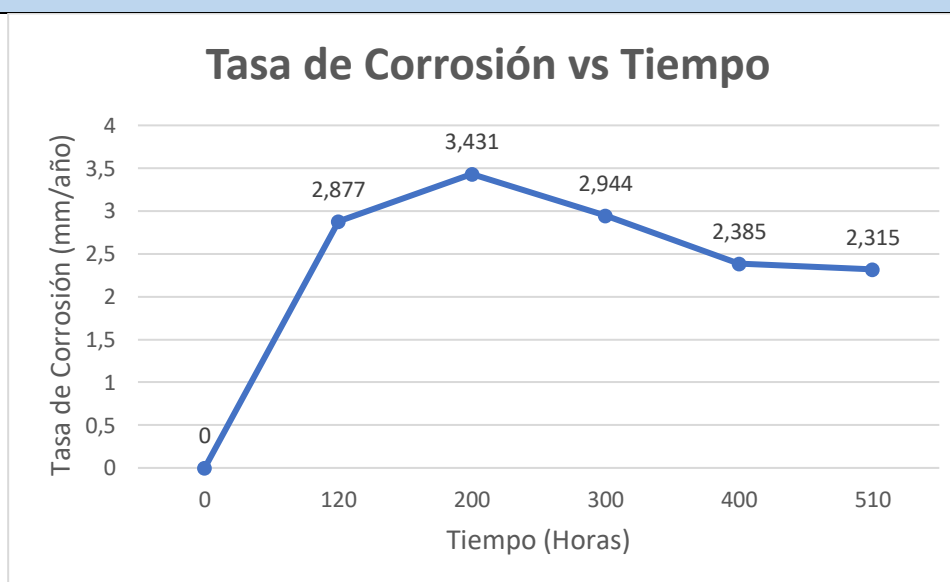
3.2.3. Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica

Ficha Técnica 3: Recolección y tabulación de datos A36PSSPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:	A36PSSPC					
Tipo de soldadura:	SMAW	Electrodo:	E-6011					
Norma:	ASTM B 117	Material:	A-36					
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,81 g/cm ³					
Limpieza:	Mecánica-Grata	Constante K:	87600					
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	65,05	72,25	47,00	141,49	140,42	1,07	2,13
2	120	57,68	73,56	42,43	127,97	127,04	0,93	2,05
3	120	59,02	72,63	42,87	129,56	128,51	1,05	2,29
4	200	59,57	72,82	43,38	129,93	127,41	2,52	3,26
5	200	64,04	73,81	47,27	141,98	139,66	2,32	2,75
6	200	64,53	73,37	47,35	140,46	138,05	2,41	2,85
7	300	60,93	71,65	43,66	131,11	127,65	3,46	2,96
8	300	59,65	70,53	42,07	126,08	122,64	3,44	3,06
9	300	61,38	71,84	44,10	130,22	126,90	3,32	2,81
10	400	60,75	73,00	44,35	134,04	130,26	3,78	2,39
11	400	61,56	73,72	45,38	137,06	133,09	3,97	2,45
12	400	61,35	73,14	44,87	131,55	127,85	3,70	2,31
13	510	63,01	71,77	45,22	136,04	131,37	4,67	2,27
14	510	60,44	72,15	43,61	131,45	126,76	4,69	2,37
15	510	62,80	72,26	45,38	136,69	131,92	4,77	2,31

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	60,58	72,81	44,11	133,01	131,99	1,017	2,877
2	200	62,71	73,33	45,99	137,46	135,04	2,417	2,431
3	300	60,65	71,34	43,27	129,14	125,73	3,407	2,944
4	400	61,22	73,29	44,87	134,22	130,40	3,817	2,385
5	510	62,08	72,06	44,74	134,73	130,02	4,710	2,315

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 y 300 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, al transcurrir las 510 horas se obtiene una disminución del espesor de 1,25 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR:	Kevin Lema / Carlos Rea
REVISADO POR:	Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

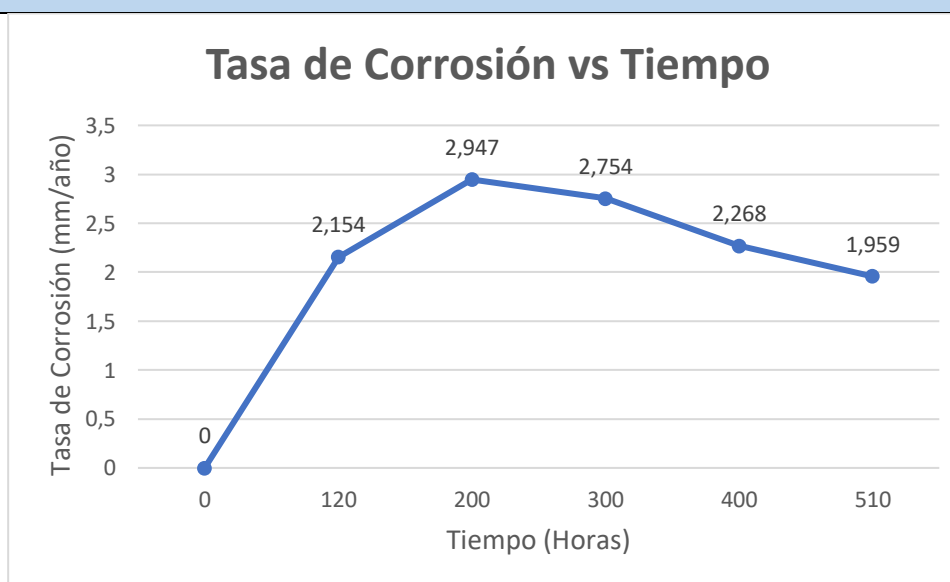
3.2.4. Acero A-36 placas soldadas con protección catódica

Ficha Técnica 4: Recolección y tabulación de datos A36PSCPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:	A36PSCPC					
Tipo de soldadura:	SMAW	Electrodo:	E-6011					
Norma:	ASTM B 117	Material:	A-36					
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,81 g/cm ³					
Limpieza:	Mecánica-Grata	Constante K:	87600					
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	62,72	72,14	45,25	135,19	133,84	1,35	2,789
2	120	61,90	73,55	45,53	137,54	136,17	1,37	2,813
3	120	61,22	71,98	44,07	132,19	130,76	1,43	3,033
4	200	60,88	72,91	44,39	135,08	132,27	2,81	3,550
5	200	61,15	72,69	44,45	135,53	132,78	2,75	3,470
6	200	60,60	73,20	44,36	134,17	131,58	2,59	3,274
7	300	62,68	70,40	44,13	133,69	130,66	3,03	2,567
8	300	62,20	72,49	45,09	134,59	131,21	3,38	2,803
9	300	59,18	71,12	42,09	125,89	122,63	3,26	2,896
10	400	60,84	73,00	44,41	132,97	129,4	3,57	2,254
11	400	61,30	72,00	44,14	134,17	130,65	3,52	2,236
12	400	60,12	71,50	42,99	129,28	125,73	3,55	2,316
13	510	62,12	71,01	44,11	132,23	128,39	3,84	1,915
14	510	59,98	72,40	43,43	131,84	127,90	3,94	1,995
15	510	62,34	71,14	44,35	133,19	129,22	3,97	1,969

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	61,95	72,56	44,95	134,97	133,59	1,383	2,154
2	200	60,88	72,93	44,40	134,93	132,21	2,717	2,937
3	300	61,35	71,34	43,77	131,39	128,17	3,223	2,754
4	400	60,75	72,17	43,84	132,14	128,59	3,547	2,268
5	510	61,48	71,52	43,97	132,42	128,50	3,917	1,959

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, después de dicho tiempo la tasa de corrosión tiende a decrecer hasta llegar a las 510 horas, en donde se puede observar una disminución del espesor de 0,75 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR: Kevin Lema / Carlos Rea

REVISADO POR: Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

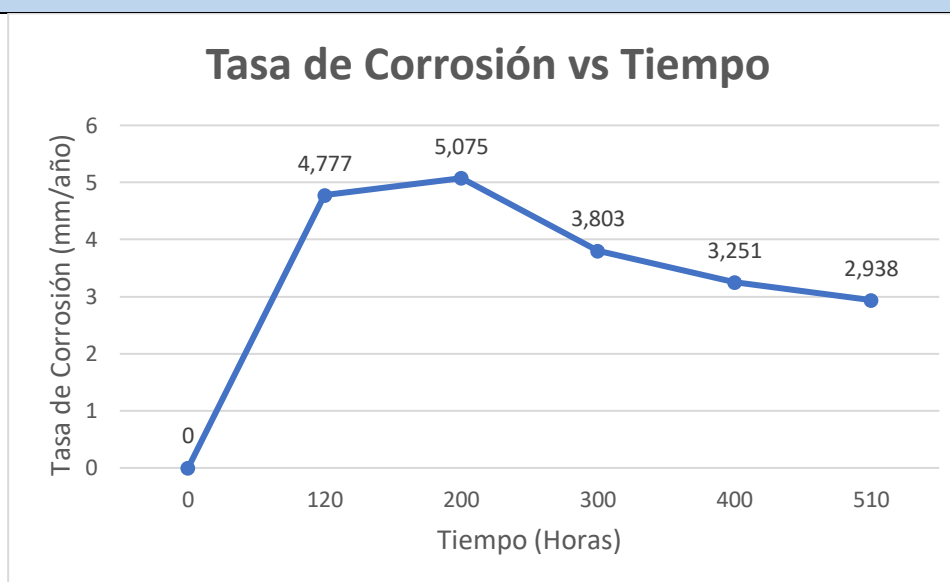
3.2.5. Acero SA-516 grado 70 placas sin protección catódica

Ficha Técnica 5: Recolección y tabulación de datos A516PSPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:		Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero						
Fecha:		19/12/2019						
Ciudad:		Ambato						
Maquina:		Cámara de niebla salina SSC 400		Codificación:		A516PSPC		
Norma:		ASTM B 117		Material:		SA-516 Grado 70		
Ensayo:		Corrosión acelerada		Densidad:		7,68 g/cm ³		
Limpieza:		Manual-Desengrasante		Constante K:		87600		
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	52,12	39,85	20,77	101,15	100,1	1,05	4,805
2	120	47,87	44,74	21,42	106,61	105,54	1,07	4,749
3	120	49,20	41,85	20,59	100,66	99,62	1,04	4,801
4	200	53,34	41,17	21,96	107,49	105,54	1,95	5,064
5	200	49,48	43,72	21,63	105,69	103,76	1,93	5,088
6	200	46,72	40,90	19,11	94,62	92,92	1,70	5,074
7	300	50,50	45,54	23,00	114,12	111,95	2,17	3,588
8	300	48,40	41,52	20,10	99,42	97,46	1,96	3,708
9	300	47,82	44,33	21,20	104,84	102,88	1,96	3,515
10	400	47,51	41,16	19,56	96,57	94,22	2,35	3,427
11	400	49,58	43,55	21,59	106,24	104,06	2,18	2,879
12	400	49,29	43,80	21,59	105,55	103,34	2,21	2,919
13	510	52,50	41,96	22,03	108,11	105,11	3,00	3,046
14	510	51,53	42,15	21,72	107,30	104,39	2,91	2,996
15	510	51,65	43,82	22,63	111,05	108,24	2,81	2,777

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	49,73	42,15	20,96	102,81	101,75	1,053	4,777
2	200	49,85	41,93	20,90	102,60	100,74	1,860	5,075
3	300	48,91	43,80	21,42	106,13	104,10	2,030	3,803
4	400	48,79	42,84	20,90	102,79	100,54	2,247	3,251
5	510	51,89	42,64	22,13	108,82	105,91	2,907	2,938

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, luego de dicho tiempo la tasa de corrosión tiende a decrecer hasta llegar a las 510 horas, además se observa una disminución del espesor de 1,5 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR:	Kevin Lema / Carlos Rea
REVISADO POR:	Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

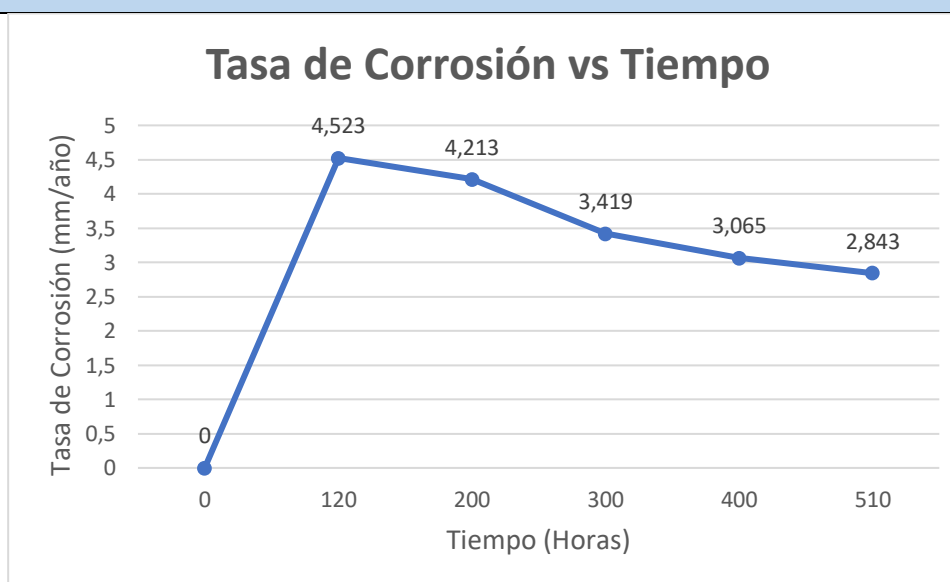
3.2.6. Acero SA-516 grado 70 placas con protección catódica

Ficha Técnica 6: Recolección y tabulación de datos A516PCPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:	A516PCPC					
Norma:	ASTM B 117	Material:	SA-516 Grado 70					
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,68 g/cm ³					
Limpieza:	Manual-Desengrasante	Constante K:	87600					
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	47,90	43,61	20,89	102,09	101,06	1,03	4,687
2	120	45,47	41,65	18,94	92,97	92,11	0,86	4,316
3	120	49,09	43,51	21,36	104,60	103,58	1,02	4,539
4	200	47,21	46,21	21,82	108,11	106,62	1,49	3,895
5	200	51,12	41,77	21,35	105,59	103,90	1,69	4,514
6	200	51,35	43,34	22,26	110,01	108,35	1,66	4,254
7	300	49,54	42,57	21,09	103,85	101,87	1,98	3,570
8	300	50,17	43,51	21,83	108,45	106,58	1,87	3,257
9	300	51,70	44,37	22,94	112,52	110,45	2,07	3,431
10	400	49,24	43,29	21,32	104,08	101,54	2,54	3,398
11	400	47,90	43,89	21,02	103,30	100,93	2,37	3,215
12	400	48,78	44,27	21,59	107,45	105,07	2,38	3,143
13	510	50,66	44,07	22,33	111,50	108,73	2,77	2,775
14	510	48,06	42,55	20,45	101,32	98,55	2,77	3,029
15	510	53,26	42,10	22,42	110,62	107,87	2,75	2,743

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	47,49	42,92	20,38	99,89	98,92	0,970	4,523
2	200	49,89	43,77	21,84	107,90	106,29	1,613	4,213
3	300	50,47	43,48	21,95	108,27	106,30	1,973	3,419
4	400	48,64	43,82	21,31	104,94	102,51	2,430	3,065
5	510	50,66	42,91	21,74	107,81	105,05	2,763	2,843

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 120 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, luego de dicho tiempo la tasa de corrosión tiende a decrecer hasta llegar a las 510 horas, y además se obtiene una disminución del espesor de 1,48 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR: Kevin Lema / Carlos Rea

REVISADO POR: Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

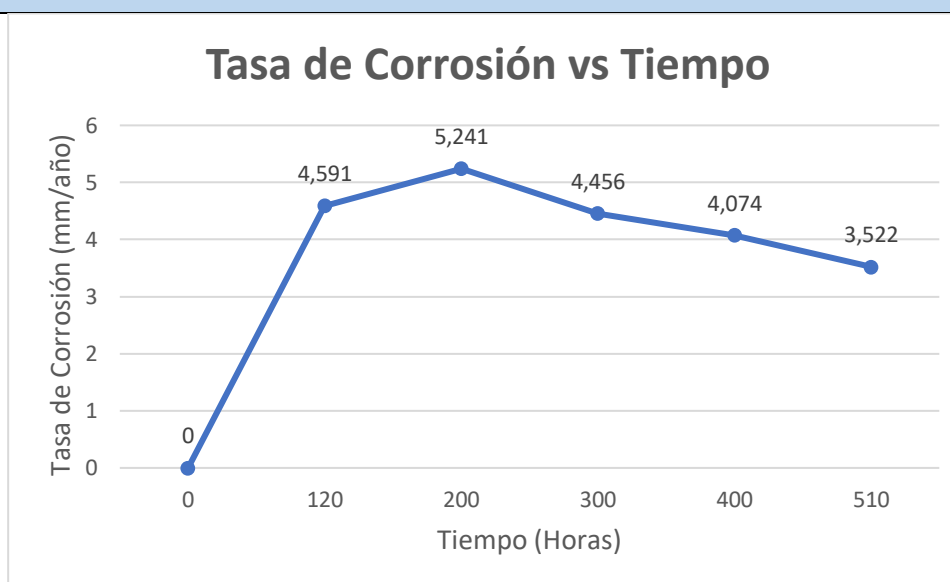
3.2.7. Acero SA-516 grado 70 placas soldadas sin protección catódica

Ficha Técnica 7: Recolección y tabulación de datos A516PSSPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Ciudad:	Ambato							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:	A516PSSPC					
Tipo de soldadura:	SMAW	Electrodo:	E-6011					
Norma:	ASTM B 117	Material:	SA 516-Grado 70					
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:	7,68 g/cm ³					
Limpieza:	Mecánica-Grata	Constante K:	87600					
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	53,42	44,42	23,73	124,21	123,06	1,15	4,607
2	120	44,55	46,47	20,70	108,74	107,81	0,93	4,270
3	120	46,24	37,90	17,52	91,41	90,5	0,91	4,936
4	200	54,26	38,44	20,86	107,87	105,86	2,01	5,496
5	200	55,72	44,71	24,91	128,21	126,18	2,03	4,647
6	200	45,60	45,93	20,94	108,28	106,21	2,07	5,637
7	300	48,71	42,40	20,65	106,04	103,58	2,46	4,529
8	300	52,03	42,26	21,99	114,60	112,00	2,60	4,496
9	300	49,66	42,47	21,09	109,84	107,43	2,41	4,345
10	400	48,50	47,23	22,91	122,00	118,82	3,18	3,959
11	400	46,62	41,46	19,33	102,69	99,75	2,94	4,337
12	400	51,51	42,50	21,89	114,50	111,46	3,04	3,960
13	510	50,63	47,63	24,12	125,32	121,52	3,80	3,524
14	510	51,51	49,61	25,55	130,51	126,77	3,74	3,273
15	510	50,74	42,20	21,41	122,13	118,48	3,65	3,812

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	48,07	42,93	20,64	108,12	107,12	0,997	4,591
2	200	51,86	43,03	22,31	114,79	112,75	2,037	5,206
3	300	50,13	42,38	21,24	110,16	107,67	2,490	4,456
4	400	48,88	43,73	21,37	113,06	110,01	3,053	4,074
5	510	50,96	46,48	23,69	125,99	122,26	3,730	3,522

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, después de dicho tiempo la tasa de corrosión tiende a decrecer hasta llegar a las 510 horas, además se obtiene una disminución del espesor de 1,74 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR: Kevin Lema / Carlos Rea

REVISADO POR: Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

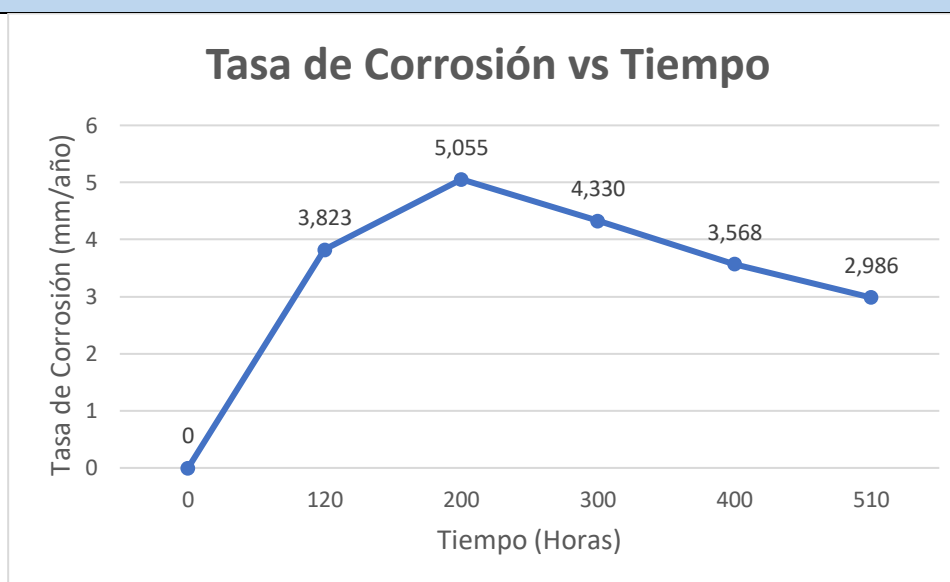
3.2.8. Acero SA-516 grado 70 placas soldadas con protección catódica

Ficha Técnica 8: Recolección y tabulación de datos A516PSCPC

FICHA DE RECOLECCION DE DATOS								
Lugar:	Laboratorio de Ensayos Climáticos Centro de Fomento Productivo Metalmecánico Carrocero							
Fecha:	19/12/2019							
Maquina:	Cámara de niebla salina SSC 400	Codificación:		A516PSCPC				
Tipo de soldadura:	SMAW	Electrodo:		E-6011				
Norma:	ASTM B 117	Material:		SA-516 Grado 70				
Ensayo:	Corrosión acelerada	Densidad:		7,68 g/cm ³				
Limpieza:	Mecánica-Grata	Constante K:		87600				
RESULTADOS								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	52,12	42,06	21,92	112,35	111,48	0,87	3,772
2	120	47,32	44,26	20,94	112,63	111,74	0,89	4,039
3	120	47,45	49,27	23,38	119,55	118,64	0,91	3,700
4	200	48,52	45,77	22,21	116,13	113,96	2,17	5,573
5	200	49,66	51,18	25,42	130,53	128,31	2,22	4,981
6	200	50,00	50,88	25,44	131,84	129,52	2,32	5,201
7	300	49,81	42,16	21,00	111,63	109,38	2,25	4,074
8	300	51,26	43,50	22,30	118,26	115,64	2,62	4,467
9	300	49,45	43,51	21,52	111,44	108,93	2,51	4,435
10	400	48,98	43,07	21,10	110,51	107,71	2,80	3,785
11	400	48,78	50,18	24,48	126,76	123,88	2,88	3,355
12	400	50,80	43,45	22,07	116,62	113,83	2,79	3,604
13	510	50,60	49,95	25,27	134,33	131,36	2,97	2,628
14	510	48,41	42,70	20,67	109,66	106,66	3,00	3,246
15	510	49,37	42,57	21,02	107,17	104,21	2,96	3,150

VALOR PROMEDIO								
ITEM	TIEMPO	DIMENSIONES			PESO			TASA DE CORROSION
Nº	Tiempo de Exposición (horas)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Área (cm ²)	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de masa (g)	Tasa de Corrosión (mm/año)
1	120	48,96	45,20	22,13	114,84	113,95	0,890	3,823
2	200	49,39	49,28	24,34	126,17	123,93	2,237	5,055
3	300	50,17	43,06	21,60	113,78	111,32	2,460	4,330
4	400	49,52	45,57	22,56	117,96	115,14	2,823	3,568
5	510	49,46	45,07	22,29	117,05	114,08	2,977	2,986

GRÁFICA



OBSEVACIONES: De acuerdo con los valores obtenidos se tiene que; a las 200 horas de haber iniciado el ensayo se observa la mayor tasa de corrosión, después de dicho tiempo la tasa de corrosión tiende a decrecer hasta llegar a las 510 horas, y además se obtiene una disminución del espesor de 1,38 mm con respecto al valor inicial.

*Se realiza el cálculo de la tasa de corrosión según la norma ASTM G1

*Para la gráfica se consideró lo siguiente: Idealmente para un tiempo de ensayo de cero horas se obtiene una tasa de corrosión igual a cero, debido a que se omiten los factores ambientales antes de realizar la prueba de corrosión acelerada que pudieran generar corrosión y que son ajenos a los parámetros iniciales del ensayo de niebla salina.

ELABORADO POR: Kevin Lema / Carlos Rea

REVISADO POR: Ing. Carlos Serrano

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019






3.3. Evaluación de pérdida de masa

En las presentes fichas expuestas se muestra la recolección de los parámetros tomados en cuenta para realizar la correcta evaluación del ensayo de niebla salina, tales como: codificación e identificación de los diversos grupos de estudio, tipo de equipo empleado para la toma de las medidas de masa, método de limpieza superficial empleada, así como el tiempo de exposición y su expectativa fotografía que muestra el daño sufrido por el fenómeno de corrosión, además, el cálculo de la pérdida de la masa. Por último, se registran las fechas en las que se realizó la extracción de las probetas ensayadas de la cámara de niebla salina.

Cabe mencionar que dicho ensayo contempla cuatro etapas las cuales son: preparación, inspección, limpieza de las muestras, y concluye con la evaluación de la tasa de corrosión, la cual se desarrolló con la ayuda de la **NORMA ASTM G1**.

3.3.1. Acero A-36 placas sin protección catódica






Ficha Técnica 9: Evaluación de pérdida de masa A36PSPC

I. del grupo:	Acero A-36 placas Sin protección catódica	Codificación:	A36PSPC		
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico		
Parámetros y Resultados					
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida
120		97,95	97,90	0,053	29/7/2019
200		97,00	96,22	0,777	02/8/2019
300		97,81	96,92	0,893	06/8/2019
400		98,49	97,45	1,043	10/8/2019
510		98,23	96,65	1,583	15/8/2019

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.2. Acero A-36 placas con protección catódica






Ficha Técnica 10: Evaluación de pérdida de masa A36PCPC

I. del grupo	Acero A-36 placas con protección catódica	Codificación	A36PCPC		
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico		
Parámetros y Resultados					
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de Salida
120		96,28	96,25	0,030	29/7/2019
200		99,54	98,88	0,660	02/8/2019
300		98,25	97,42	0,823	06/8/2019
400		96,88	95,92	0,967	10/8/2019
510		99,85	98,73	1,123	15/8/2019

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.3. Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica






Ficha Técnica 11: Evaluación de pérdida de masa A36PSSPC

I. del grupo	Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica	Codificación	A36PSSPC		
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico		
Parámetros y Resultados					
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida
120		133,01	132,80	0,203	29/7/2019
200		138,02	136,76	1,263	02/8/2019
300		129,65	128,34	1,313	06/8/2019
400		134,42	132,98	1,440	10/8/2019
510		134,83	132,91	1,920	15/8/2019

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.4. Acero A-36 placas soldadas con protección catódica






Ficha Técnica 12: Evaluación de pérdida de masa A36PSCPC

I. del grupo	Acero A-36 placas soldadas con protección catódica	Codificación	A36PSCPC		
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico		
Parámetros y Resultados					
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida
120		135,01	134,94	0,070	29/7/2019
200		135,06	134,03	1,033	02/8/2019
300		131,46	130,24	1,220	06/8/2019
400		132,27	130,92	1,357	10/8/2019
510		132,53	131,08	1,443	15/8/2019

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.5. Acero SA-516 grado 70 placas sin protección catódica






Ficha Técnica 13: Evaluación de pérdida de masa A516PSPC

I. del grupo	Acero SA-516 placas sin protección catódica	Codificación	A516PSPC			
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico			
Parámetros y Resultados						
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida	
120		99,89	99,85	0,040	29/7/2019	
200		108,18	107,63	0,553	02/8/2019	
300		108,37	107,62	0,757	06/8/2019	
400		105,11	104,17	0,943	10/8/2019	
510		107,71	106,44	1,277	15/8/2019	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.6. Acero SA-516 grado 70 placas con protección catódica






Ficha Técnica 14: Evaluación de pérdida de masa A516PCPC

I. del grupo	Acero SA-516 grado 70 placas con protección catódica	Codificación	A516PCPC			
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico			
Parámetros y Resultados						
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida	
120		102,84	102,82	0,020	29/7/2019	
200		102,60	102,19	0,413	02/8/2019	
300		106,13	105,59	0,540	06/8/2019	
400		102,95	102,31	0,643	10/8/2019	
510		108,82	107,96	0,863	15/8/2019	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.7. Acero SA-516 grado 70 placas soldadas sin protección catódica



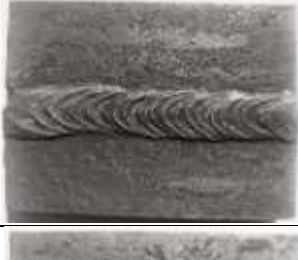


Ficha Técnica 15: Evaluación de pérdida de masa A516PSSPC

I. del grupo:	Acero SA-516 grado 70 placas soldadas sin protección catódica	Codificación:	A516PSSPC		
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico		
Parámetros y Resultados					
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida
120		108,12	108,05	0,067	29/7/2019
200		114,86	114,09	0,770	2/8/2019
300		110,16	109,19	0,967	6/8/2019
400		113,06	112,07	0,993	10/8/2019
510		125,65	124,18	1,477	15/8/2019

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.3.8. Acero SA-516 grado 70 placas soldadas con protección catódica

Ficha Técnica 16: Evaluación de pérdida de masa A516PSCPC

I. del grupo:	Acero SA-516 grado 70 placas soldadas con protección catódica	Codificación	A516PSCPC			
Equipo:	Balanza de precisión JADEVER SNUG III	Limpieza:	Manual-Desoxidante orgánico			
Parámetros y Resultados						
Tiempo de exposición (horas)	Imagen de la muestra	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Pérdida de Masa (g)	Fecha de salida	
120		114,96	114,92	0,040	29/7/2019	
200		126,17	125,50	0,667	2/8/2019	
300		113,78	113,04	0,737	6/8/2019	
400		118,01	117,12	0,893	10/8/2019	
510		117,09	115,97	1,120	15/8/2019	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

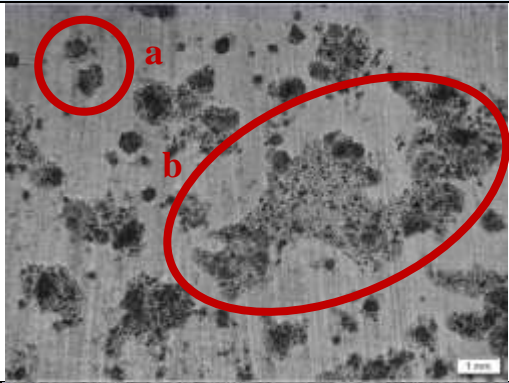
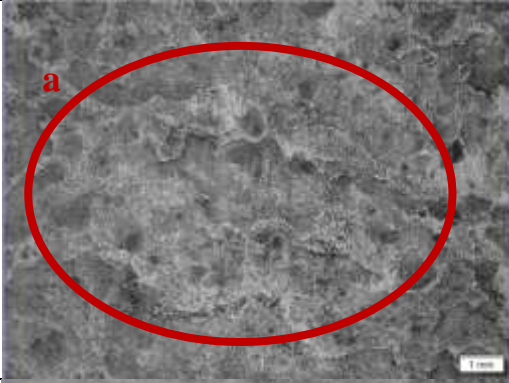
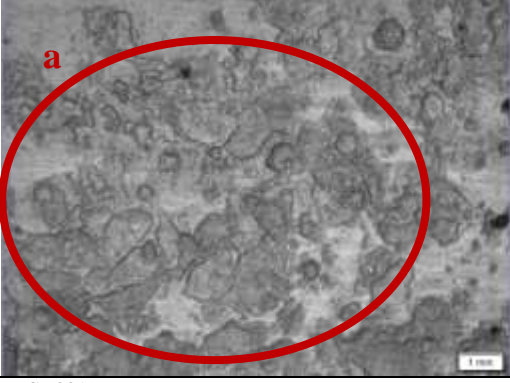
3.4. Evaluación visual del tipo de corrosión

En las presentes fichas expuestas se muestra la recolección de los parámetros tomados en cuenta para realizar la correcta evaluación del ensayo de niebla salina, tales como: codificación e identificación de los diversos grupos de estudio, el microscopio empleado para visualizar las probetas, así como la cámara para la toma de las macrografías de las probetas ensayadas, así como el tiempo de exposición y su expectativa macrografía que muestra el daño sufrido por el fenómeno de corrosión. Por último, se identifica y se describe el tipo de corrosión presente en las probetas ensayadas.

Cabe mencionar que para la realización de dicha descripción se la realizó de las probetas que presentan el mayor daño por corrosión para cada diferente tiempo de exposición, y se complementa con información de la disminución del espesor del material de ser el caso.

3.4.1. Acero A-36 placas sin protección catódica


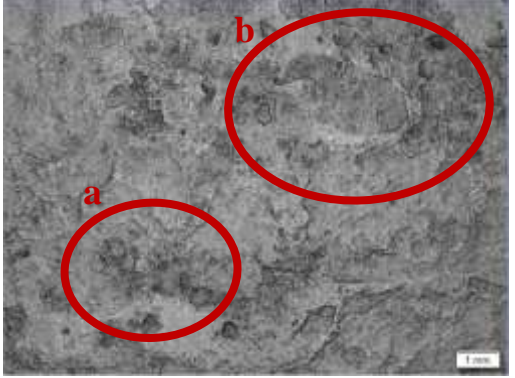
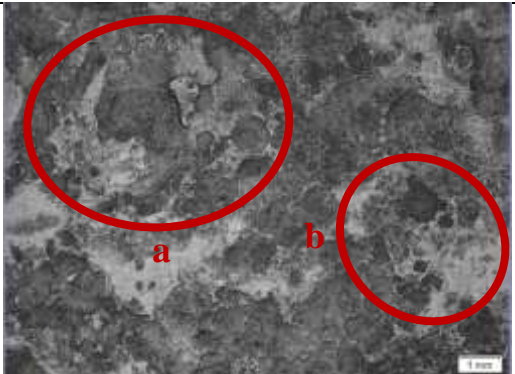
Ficha Técnica 17: Evaluación visual A36PSPC

I. del grupo:	Acero A-36 placas sin protección catódica	Codificación:	A36PSPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.-Presenta corrosión por picaduras, en toda la superficie de la probeta ensayada.</p> <p>b.- Se observa corrosión generalizada.</p>	
300		<p>a.- Se puede evidenciar corrosión por erosión, con una disminución del espesor del material de aproximadamente 0,70 mm</p>	
510		<p>a.- Se logra observar corrosión por erosión con una mayor intensidad que en la muestra anterior, con una disminución del espesor del material de 1,25 mm aproximadamente.</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.2. Acero A-36 placas con protección catódica

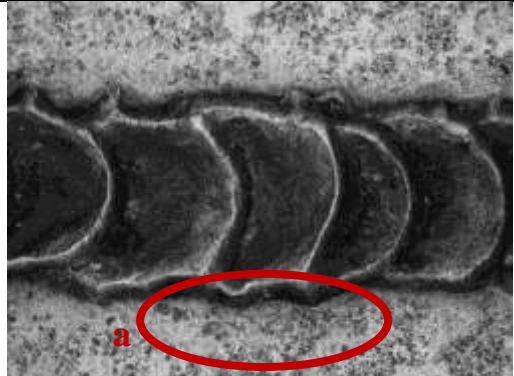
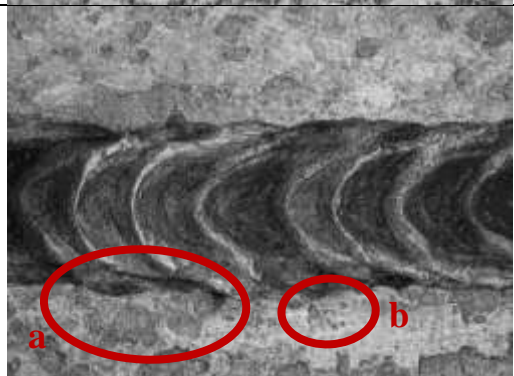
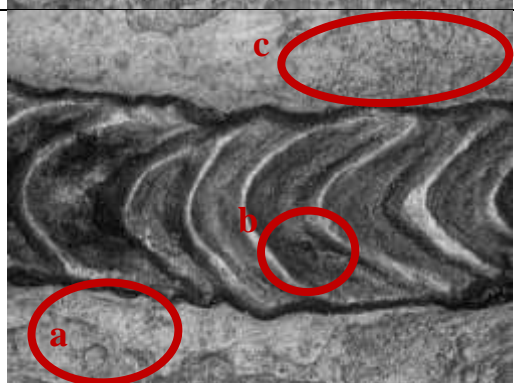
Ficha Técnica 18: Evaluación visual A36PCPC

I. del grupo:	Acero A-36 placas con protección catódica	Codificación:	A36PCPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		a.- Se puede observar la presencia de corrosión generalizada en la mayoría de la superficie de la muestra.	
300		a.- Se observa corrosión por picadura. b.- Se puede evidenciar corrosión por erosión.	
510		a.- Se puede observar una corrosión por erosión, con una disminución del espesor del material de 0,75 mm aproximadamente. b.- Se logra observar corrosión por picaduras.	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.3. Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica

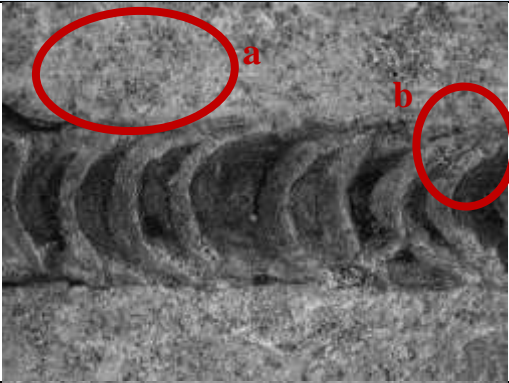
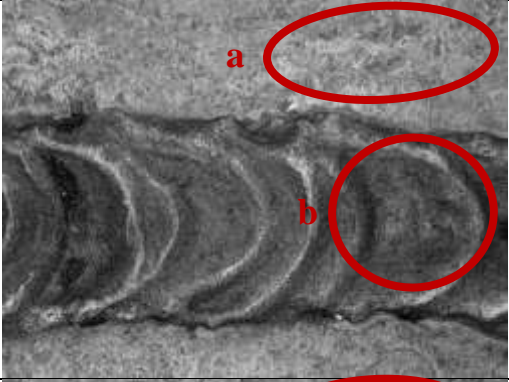

Ficha Técnica 19: Evaluación visual A36PSSPC

I. del grupo:	Acero A-36 placas soldadas sin protección catódica	Codificación:	A36PSSPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se puede observar corrosión por picaduras en el metal base, es decir a lo largo de la zona afectada por el calor (ZAT)</p>	
300		<p>a.- Se observa que existe la presencia de corrosión por erosión únicamente en el metal base.</p> <p>b.- Se logra observar la presencia de corrosión por picaduras en el metal base.</p>	
510		<p>a.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por erosión, con una disminución de 1 mm del espesor inicial.</p> <p>b.- Se observa la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p> <p>c.- Se logra observar la presencia de corrosión por picaduras en el material base</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.4. Acero ASTM A-36 placas soldadas con protección catódica

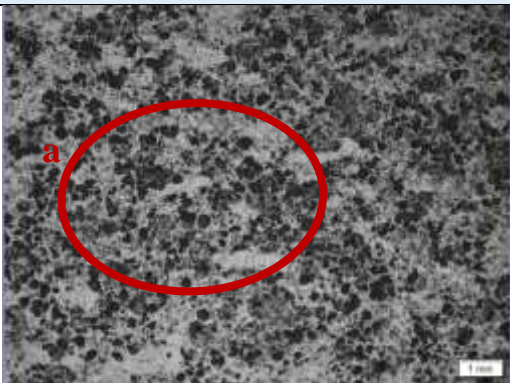
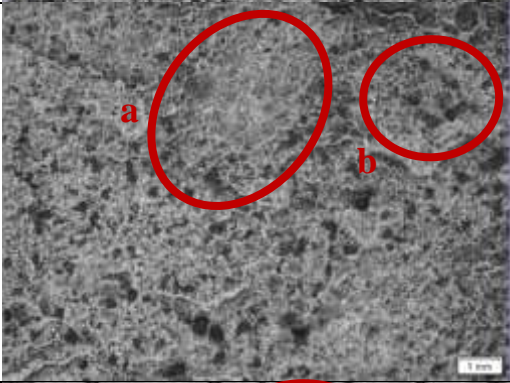
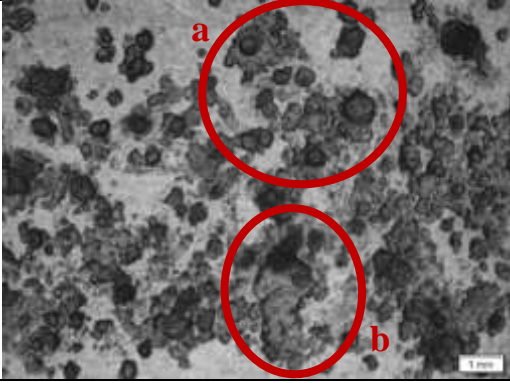
Ficha Técnica 20: Evaluación visual A36PSCPC

I. del grupo:	Acero ASTM A-36 placas soldadas con protección catódica	Codificación:	A36PSCPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se observa la presencia de corrosión por picaduras en el material base.</p> <p>b.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p>	
300		<p>a.- Se logra observar la presencia de corrosión por erosión en el metal base, con una disminución del espesor de 0,50 mm aproximadamente.</p> <p>b.- Se puede observar la presencia de corrosión por picadura en el cordón de soldadura.</p>	
510		<p>a.- Se observa la presencia de corrosión por erosión en el cordón de soldadura.</p> <p>b.- Se logra observar la presencia de corrosión por picadura en el material base.</p> <p>c.- Se puede observar la presencia de corrosión por erosión en el material base, con una disminución del espesor de 1,15 mm aproximadamente.</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.5. Acero SA-516 Grado 70 placas sin protección catódica

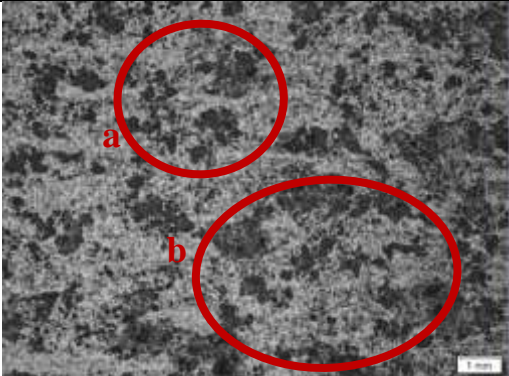
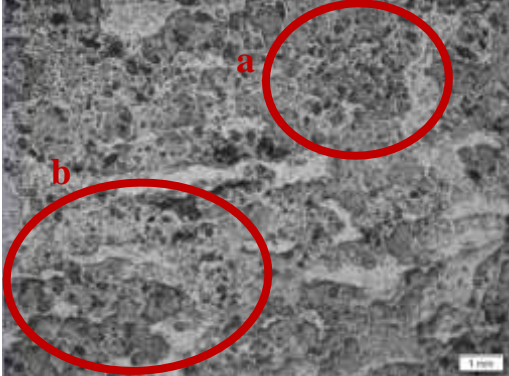
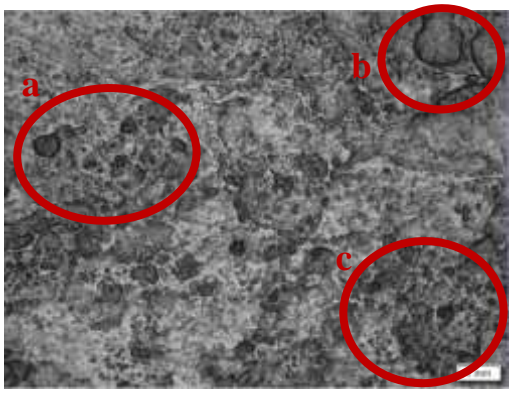
Ficha Técnica 21: Evaluación visual A516PSPC

I. del grupo	Acero SA-516 Grado 70 placas sin protección catódica	Codificación:	A516PSPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por picaduras, en toda la superficie de la muestra ensayada.</p>	
300		<p>a.- Se logra observar la presencia de corrosión por erosión.</p> <p>b.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por picaduras.</p>	
510		<p>a.- Se puede observar la presencia de corrosión por picadura.</p> <p>b.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por erosión, con una disminución de 1,10 mm del espesor inicial aproximadamente</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.6. Acero SA-516 Grado 70 placas con protección catódica

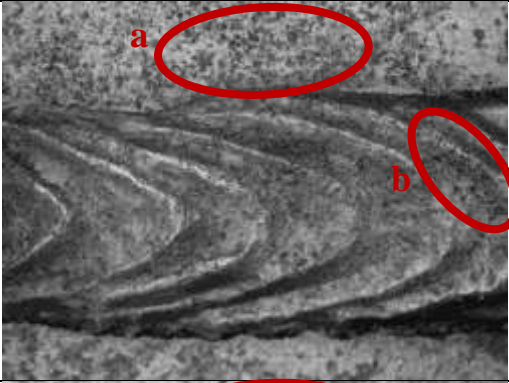
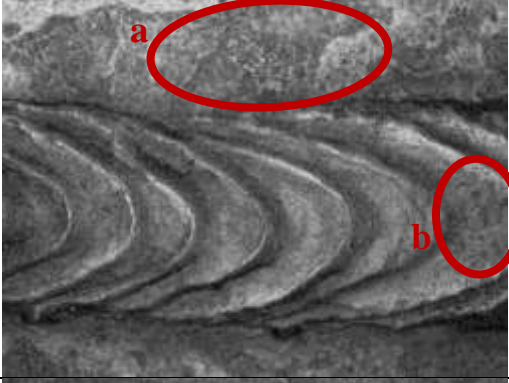

Ficha Técnica 22: Evaluación visual A516PCPC

I. del grupo	Acero SA-516 Grado 70 placas con protección catódica	Codificación:	A516PCPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por picaduras en la mayoría de la superficie de la muestra ensayada.</p> <p>b.- Se puede observar la presencia de corrosión generalizada en la mayoría de la superficie de la muestra ensayada.</p>	
300		<p>a.- Se observa la presencia de corrosión por picadura.</p> <p>b.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por erosión.</p>	
510		<p>a.- Se logra observar la presencia de corrosión por picaduras.</p> <p>b.- Se puede observar una corrosión por erosión, con una disminución del espesor del material de 1,2 mm aproximadamente.</p> <p>c.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por picaduras.</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.7. Acero SA-516 placas soldadas sin protección catódica

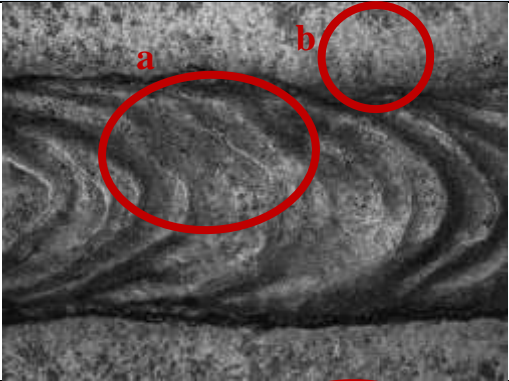
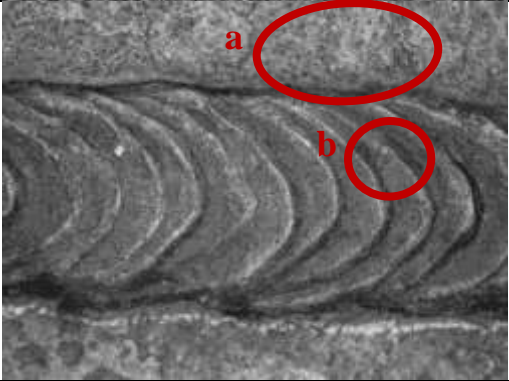
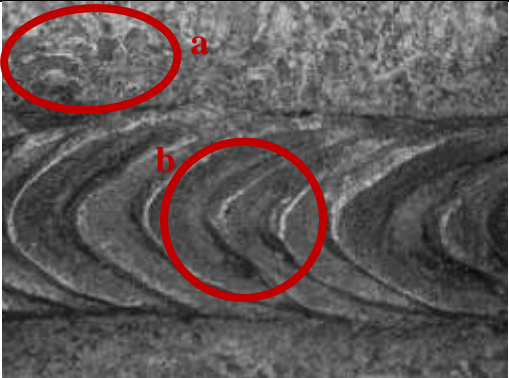
Ficha Técnica 23: Evaluación visual A516PSSPC

I. del grupo:	Acero SA-516 placas soldadas sin protección catódica	Codificación:	A516PSSPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se puede observar la presencia de corrosión por picaduras en el metal base.</p> <p>b.- Se logra evidenciar la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p>	
300		<p>a.- Se observa que existe la presencia de corrosión por erosión únicamente en el metal base.</p> <p>b.- Se logra observar la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p>	
510		<p>a.- Se observa la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p> <p>b.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por erosión, con una disminución de 1 mm del espesor inicial aproximadamente.</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.4.8. Acero SA-516 placas soldadas con protección catódica

Ficha Técnica 24: Evaluación visual A516PSCPC

I. del grupo:	Acero SA-516 placas soldadas con protección catódica	Codificación:	A516PSCPC
Microscopio:	Olympus SZ 61	Cámara:	Olympus SC 30
Parámetros y Resultados			
Tiempo de exposición (horas)	Macrografía de la muestra	Descripción	
120		<p>a.- Se puede observar la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p> <p>b.- Se logra evidenciar la presencia de corrosión por picaduras en el metal base.</p>	
300		<p>a.- Se observa que existe la presencia de corrosión por erosión solamente en el metal base.</p> <p>b.- Se logra observar la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p>	
510		<p>a.- Se puede evidenciar la presencia de corrosión por erosión, con una disminución de 1 mm del espesor inicial aproximadamente.</p> <p>b.- Se observa la presencia de corrosión por picaduras en el cordón de soldadura.</p>	

Fuente: Lema, K.; & Rea, C., 2019

3.5. Comparación del método de protección

En el presente apartados se observa la descripción y características del tipo de curva de corrosión obtenidos en las muestras a lo largo del ensayo de corrosión acelerada, además se evidencia el tiempo de exposición de cada probeta ensayada, y su correspondiente valor de tasa de corrosión, en comparación con las probetas que se encuentran con protección catódica y las que no se encuentran protegidas, así como también la representación de la curva de la pérdida de masa, para su posterior análisis.

3.5.1. Muestras de acero A-36 placas

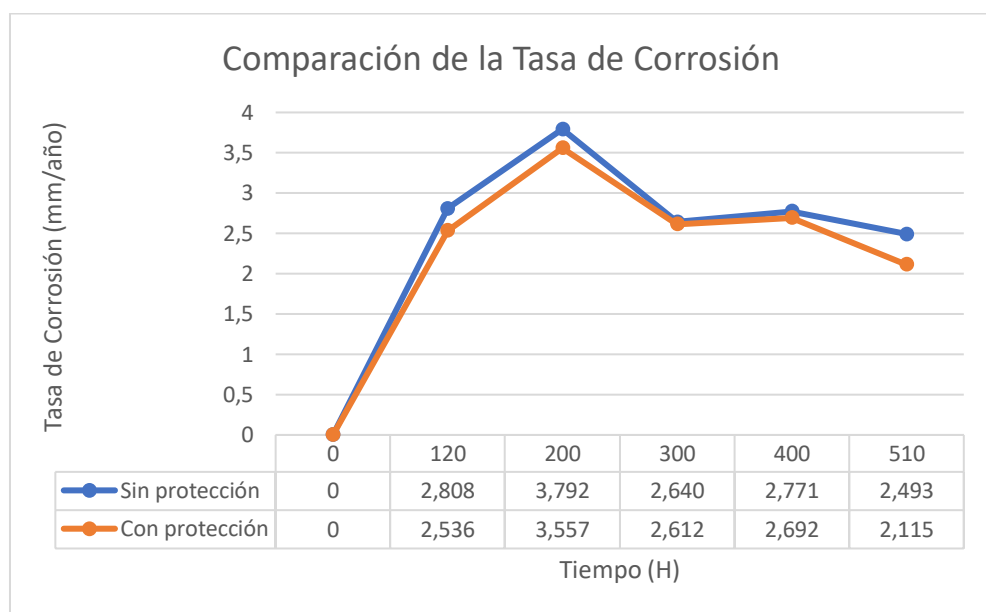


Gráfico 1-3. Comparación de la tasa de corrosión acero A-36 placas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 1-3** se puede observar que las curvas de la tasa de corrosión presentan tendencias de crecimiento similares, con un valor máximo de 3,792 mm/año para las muestras sin protección catódica, mientras que las muestras que se encuentran protegidas presentan un valor máximo de 3,557 mm/año, existiendo una diferencia de tasa de corrosión de 0,235 mm/año, estos valores se obtienen luego de haber transcurrido un tiempo de 200 horas. Al finalizar el ensayo se puede evidenciar que se obtienen los valores más bajos de toda la prueba, obteniendo valores de 2,493 mm/año para las muestras sin protección catódica, y de 2,115 mm/año para las muestras que están protegidas, con una diferencia de 0,38 mm/año. Cabe mencionar que la curva de las muestras sin protección tiende a intentar estabilizarse luego de las 400 horas, mientras que la curva de las muestras protegidas presenta una tendencia a seguir decreciendo.

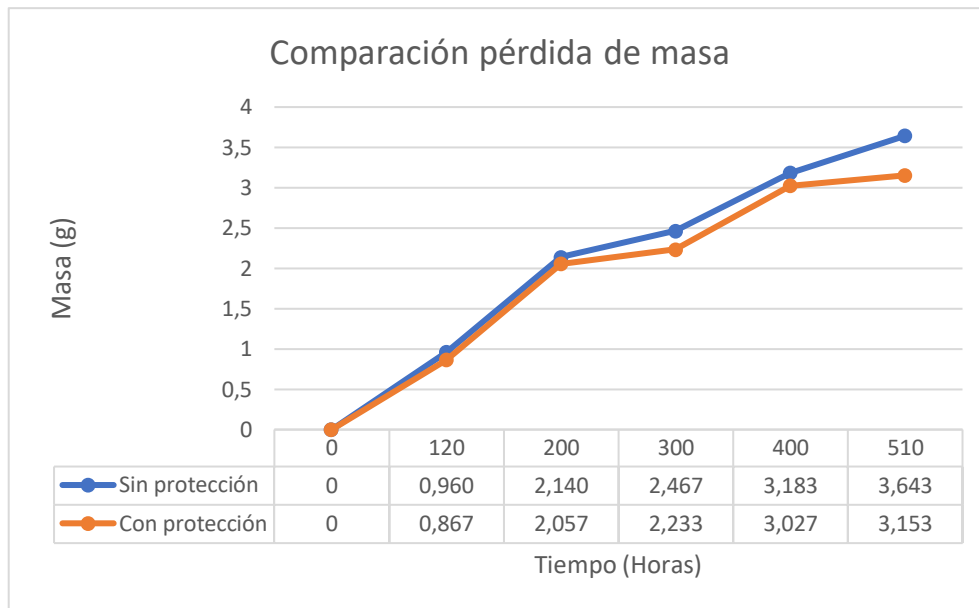


Gráfico 2-3. Comparación de la pérdida de masa acero A-36 placas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 2-3** se observa que hasta las 200 horas de haber iniciado el ensayo en ambos casos las curvas de pérdida de masa presentan una tendencia de crecimiento lineal, a las 300 horas se puede evidenciar una discontinuidad al crecimiento lineal para los dos casos, hasta finalizar el ensayo las muestras sin protección siguen con la tendencia lineal de crecimiento, obteniendo una pérdida de masa con un valor de 3,643 g, mientras que las muestras protegidas muestran una tendencia de estabilidad en el intervalo de 400 a 510 horas, con una pérdida de masa de 3,153 g como máximo, existiendo una diferencia de 0,49 g de pérdida de masa al finalizar el ensayo.

3.5.2. Muestras de acero A-36 placas soldadas

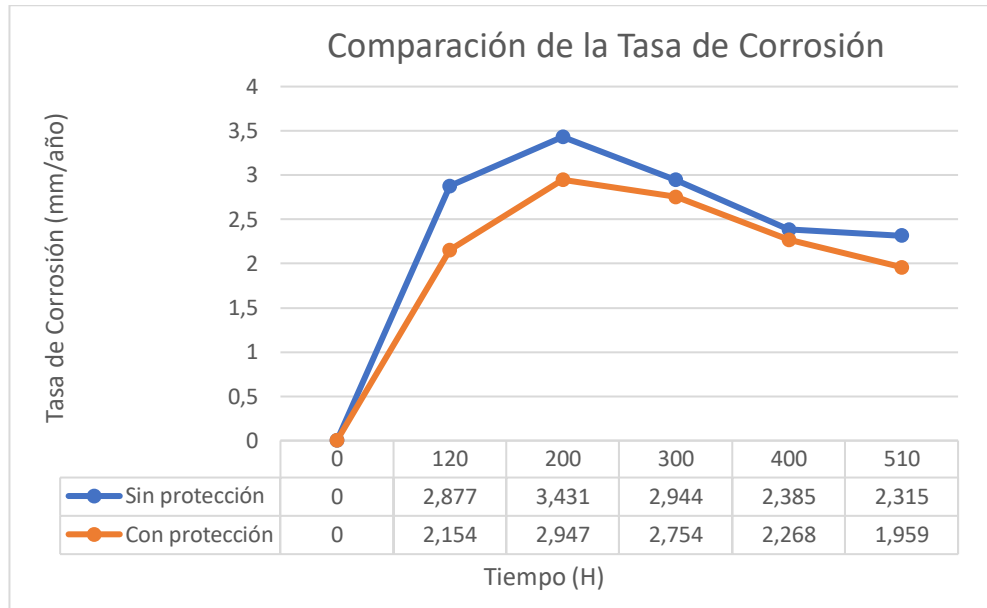


Gráfico 3-3. Comparación de la tasa de corrosión acero A-36 placas soldadas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 3-3** se puede observar que las curvas de la tasa de corrosión presentan tendencias de crecimiento similares, con un valor máximo de 3,431 mm/año para las muestras sin protección catódica, mientras que las muestras que se encuentran protegidas presentan un valor máximo de 2,947 mm/año, existiendo una diferencia de tasa de corrosión de 0,484 mm/año, estos valores se obtienen luego de haber transcurrido un tiempo de 200 horas. Al finalizar el ensayo se puede evidenciar que se obtienen los valores más bajos de toda la prueba, obteniendo valores de 2,315 mm/año para las muestras sin protección catódica, y de 1,959 mm/año para las muestras que están protegidas, con una diferencia de 0,356 mm/año. Cabe mencionar que la curva de las muestras sin protección tiende a intentar estabilizarse luego de las 400 horas, mientras que la curva de las muestras protegidas presenta una tendencia casi lineal a seguir decreciendo.

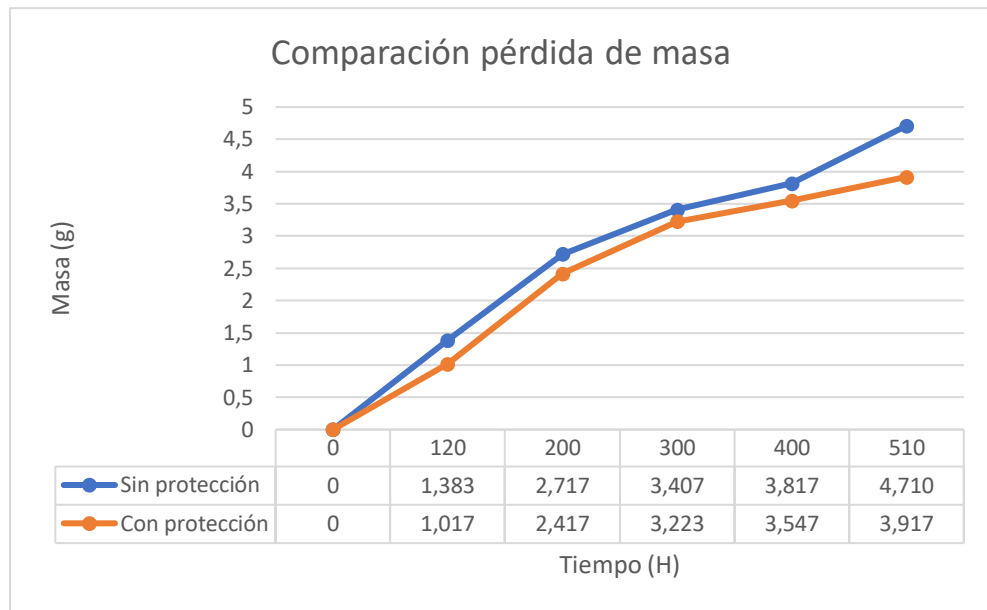


Gráfico 4-3. Comparación de la pérdida de masa acero A-36 placas soldadas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 4-3** se observa que hasta las 300 horas de haber iniciado el ensayo en ambos casos las curvas de pérdida de masa presentan una tendencia de crecimiento casi lineal, a las 400 horas se puede evidenciar una discontinuidad al crecimiento lineal para los dos casos, hasta finalizar el ensayo las muestras sin protección siguen con la tendencia lineal de crecimiento, obteniendo una pérdida de masa de 4,710 g, mientras que las muestras protegidas muestran una tendencia de crecimiento con una inclinación no tan pronunciada en el intervalo de 300 a 510 horas, con una pérdida de masa de 3,917 g, existiendo una diferencia de 0,793 g de pérdida de masa al finalizar el ensayo.

3.5.3. Muestras de acero SA-516 grado 70 placas

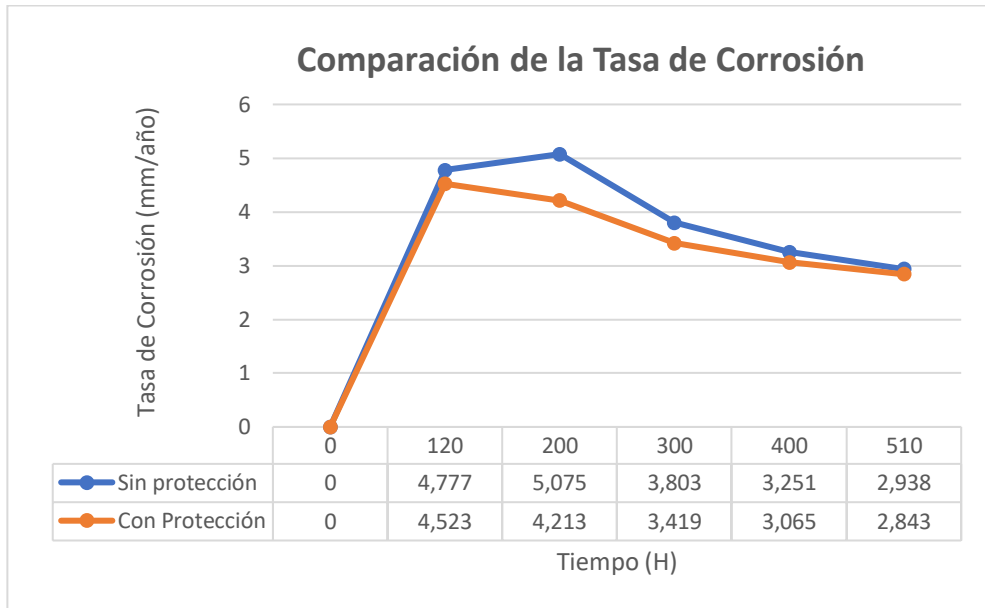


Gráfico 5-3. Comparación de la tasa de corrosión acero SA-516 grado 70 placas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 5-3** se puede observar que las curvas de la tasa de corrosión presentan tendencias de crecimiento similares, con un valor máximo de 5,075 mm/año para las muestras sin protección catódica en un tiempo de 200 horas, mientras que las muestras que se encuentran protegidas presentan un valor máximo de 4,523 mm/año en un tiempo de 120 horas, existiendo una diferencia de tasa de corrosión de 0,552 mm/año, este valor se obtiene luego de haber transcurrido un tiempo de 200 y 120 horas respectivamente. Al finalizar el ensayo se puede evidenciar que se obtienen los valores más bajos de toda la prueba para los dos casos, obteniendo valores de 2,938 mm/año para las muestras sin protección catódica, y de 2,843 mm/año para las muestras que están protegidas, con una diferencia de 0,095 mm/año. Cabe mencionar que los puntos finales de las dos gráficas se aproximan al mismo valor y presentan una tendencia a decrecer.

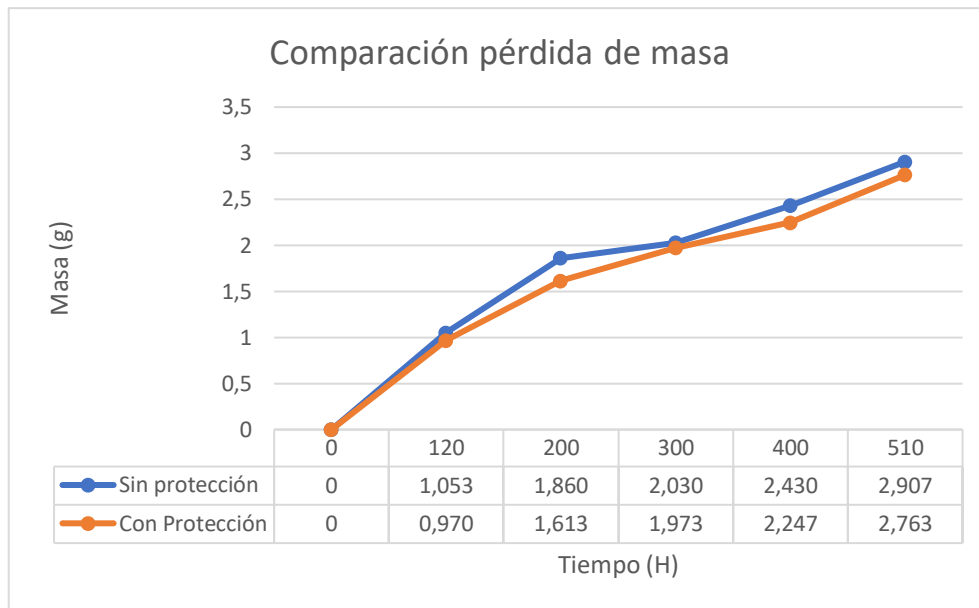


Gráfico 6-3. Comparación de la pérdida de masa acero SA-516 grado 70 placas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 6-3** se observa que curva de las muestras con protección catódica presenta un crecimiento casi lineal a lo largo de todo el ensayo, con una pérdida de masa máxima de 2,763 g, mientras que, las muestras sin protección presentan un crecimiento lineal hasta las 200 horas de ensayo, en las 300 horas se puede evidenciar una discontinuidad al crecimiento lineal, pero a partir de éste mismo tiempo se nota un crecimiento lineal hasta terminar el ensayo, con una pérdida de masa máxima de 2,907 g, existiendo una diferencia de 0,144 g de pérdida de masa al final del ensayo.

3.5.4. Muestras de acero SA-516 grado 70 placas soldadas

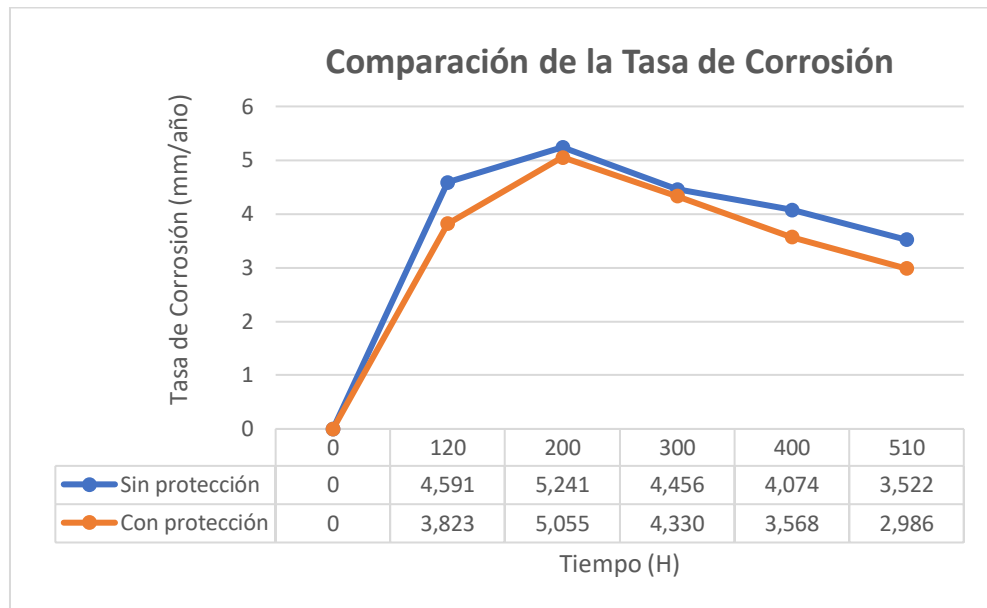


Gráfico 7-3. Comparación de la tasa de corrosión acero SA-516 grado 70 placas soldadas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 7-3** se puede observar que las curvas de la tasa de corrosión presentan tendencias de crecimiento similares, con un valor máximo de 5,241 mm/año para las muestras sin protección catódica, mientras que las muestras que se encuentran protegidas presentan un valor máximo de 5,055 mm/año, existiendo una diferencia de tasa de corrosión de 0,186 mm/año, estos valores se obtienen luego de haber transcurrido un tiempo de 200 horas. Al finalizar el ensayo se puede evidenciar que se obtienen los valores más bajos de toda la prueba, obteniendo valores de 3,522 mm/año para las muestras sin protección catódica, y de 2,986 mm/año para las muestras que están protegidas, con una diferencia de 0,536 mm/año. Cabe mencionar que las dos curvas a partir de las 200 horas tienden a decrecer en forma lineal, pero con la consideración que existe una discontinuidad a las 300 horas para el caso de las muestras sin protección.

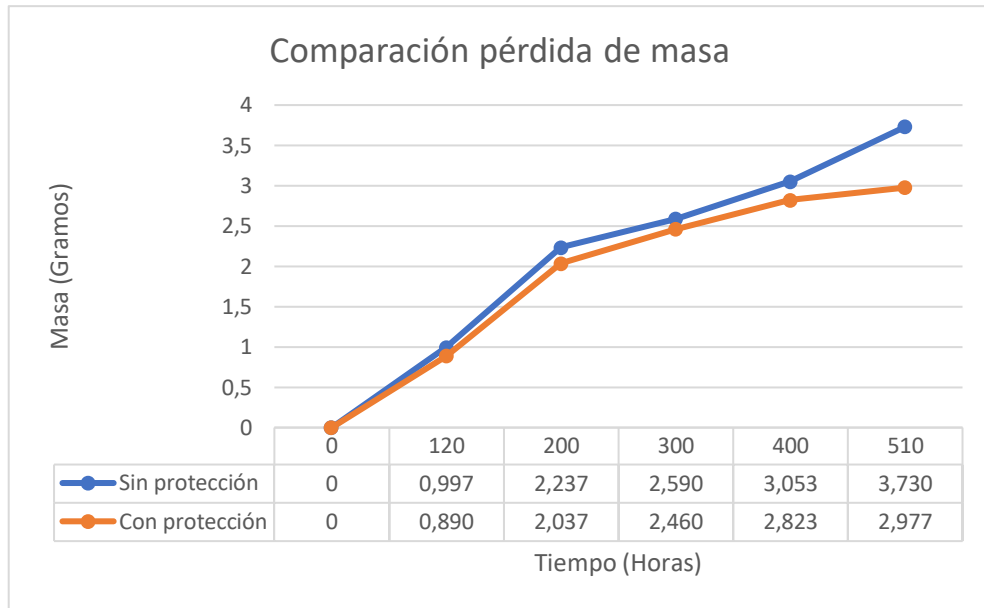


Gráfico 8-3. Comparación de la pérdida de masa acero SA-516 grado 70 placas soldadas

Realizado por: Lema, K.; & Rea, C., 2019

En el **Gráfico 8-3** se observa que hasta las 200 horas de haber iniciado el ensayo en ambos casos las curvas de pérdida de masa presentan una tendencia de crecimiento lineal, a partir de este tiempo se puede evidenciar que existe otra tendencia casi lineal de menor inclinación para los dos casos, este comportamiento se lo observa hasta finalizar el ensayo, las muestras sin protección obtiene una pérdida de masa con un valor de 3,73 g, mientras que las muestras protegidas presentan una pérdida de masa de 2,977 g, existiendo una diferencia de 0,753 g de pérdida de masa al finalizar el ensayo.

CONCLUSIONES

- En las placas soldadas de acero SA-516 grado 70 sin protección catódica a las 200 horas presentan la mayor concentración de corrosión entre todas las muestras analizadas llegando a un valor máximo de 5,241 mm/año para las muestras sin protección catódica. Un factor decisivo para que se produzca dicho fenómeno, es la rugosidad y porosidad que está presente en la capa superficial del material, que conlleva a la adsorción del rocío de niebla salina al metal. Por otra parte, en las placas soldadas de acero A-36 con protección catódica, en el mismo tiempo se puede evidenciar la menor tasa de corrosión, llegando a un valor de 2,947 mm/año. Esto se produjo debido a que este material tiene una capa superficial lisa y sin poros contrario al otro caso que evita la adsorción de la solución salina.
- El aluminio empleado como ánodo de sacrificio resultó tener un buen rendimiento para la protección contra la corrosión que se genera en ambientes salinos, debido a que es un material reactivo con un bajo potencial electroquímico.
- Empleando la norma ASTM G1 se logró calcular la tasa de corrosión, teniendo en cuenta la pérdida de masa presente en las muestras. Se pudo identificar los tipos de corrosión presentes en las muestras ensayadas por medio de una macrografía, teniendo como resultados una corrosión por erosión y por picaduras en todos los casos, siendo causado por el rocío de flujo turbulento de la solución salina utilizada como medio corrosivo
- Se puede evidenciar en todos los casos de estudio a medida que avanza el tiempo de ensayo la tasa de corrosión tiende a decrecer, esto se produce debido a que en las primeras horas de ensayo la capa protectora natural del material se rompe y sufre la mayor degradación, posterior a esto, el material tiende a estabilizarse, razón por la cual la tasa de corrosión es menor. Por otra parte, en la pérdida de masa se tiene un comportamiento totalmente distinto al anterior ya que presenta un crecimiento lineal ascendente o directamente proporcional con respecto al tiempo.
- Las probetas ensayadas presentan un desprendimiento de material debido a la presencia de corrosión por erosión y picaduras, los casos más críticos se encuentran en las probetas soldadas, observando en el acero SA-516 grado 70 sin protección catódica una disminución de espesor de 1,25 mm aproximadamente. Por otra parte, en las placas soldadas de acero A-36 se observa la mayor pérdida de masa, llegando a 4,71 g para el caso sin protección catódica.

- El sistema de protección catódica presenta una disminución promedio de la tasa de corrosión de aproximadamente 10,15%, en las juntas soldadas de acero SA-516 grado 70, para un ambiente corrosivo de solución salina a una temperatura de 35 °C y con un flujo de 0,5 L/h
- De igual manera, existe una disminución promedio de la pérdida de masa de 10,52% aproximadamente, en las juntas soldadas de acero SA-516 grado 70 que se encuentran con protección catódica, evaluado en las mismas condiciones.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda emplear ensayos de campo, con la ayuda de cupones de corrosión para de esta manera tener valores más reales sobre el fenómeno de corrosión.
- Los valores obtenidos de la tasa de corrosión en un ensayo acelerado no se recomiendan para predecir la vida del material, debido a que existe la presencia de corrosión localizada.
- Tener en cuenta todos los parámetros que señala la norma ASTM B 117 para realizar un correcto ensayo de niebla salina y evitar la presencia de humedad en las placas para prevenir posteriores errores de medición y cálculo.
- Realizar un correcto método de limpieza al finalizar el tiempo de exposición, tal como se describe en el capítulo II, para cada lote ensayado. Cabe recalcar que el tiempo de exposición de las muestras en el horno no debe ser muy elevado, al igual que la temperatura, porque puede producir alteraciones en la microestructura del material.
- Considerar la fórmula presente en la norma ASTM B 117 para el cálculo del soluto en función al solvente necesario para el ensayo. Con la consideración de que existe un volumen muerto de 8 litros por la configuración del reservorio en nuestro caso.

BIBLIOGRAFÍA

NACE International. (2019). Historia de la NACE International. Recuperado de: <https://www.nace.org/about/nace-history>

NACE International. "This Technical Committee Report has been prepared by Techniques for Monitoring Corrosion and Related Parameters in Field Applications". *NACE International Publication 3T199* [en línea], 1999, (24203), pp. 01-41. [Consulta: 11 Julio 2019]. Disponible en: http://www.cosasco.com/documents/Corrosion_Monitoring_Techniques.pdf

MINA CEVALLOS, Evelyn Adriana. Ensayos de corrosión metálica en laboratorio y su correlación con ensayos de campo [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2011. Pp. 13-27. [Consulta: 11 Julio 2019]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2741>

YÉPEZ INTRIAGO, Ambar Carolina. Estudio de Recubrimientos Anticorrosivos Aplicados sobre Acero A-36 y su Incidencia en la Tasa de Corrosión Utilizando la Cámara de Niebla Salina [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2017. Pp. 01-04. [Consulta: 11 Julio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26542>

VILLEGAS FREIRE, Luis Miguel. Análisis de la Tasa de Corrosión en la Cámara de Niebla Salina de las Juntas Soldadas de Acero Estructural A-36 Mediante Proceso SMAW con los Electrodo de Acero al Carbono Utilizando un Recubrimiento Anticorrosivo a Base de Solvente [en línea] (Trabajo de titulación). (Ingeniería) Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. 2019. Pp. 01-03. [Consulta: 11 Julio 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29534>

SMITH, W. & HASHEMI J. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de los Materiales [en línea]. 4ª ed. México: McGraw-Hill, 2006. [Consulta: 15 Julio 2019]. Disponible en: <https://archive.org/details/FundamentosDeLaCienciaEIngenieriaDeMaterialesEdicion4WilliamF.SmithJavadHashemi>

CALLISTER, W. *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Barcelona, España: Reverté, S.A., 1995. ISBN: 978-84-291-7253-9, pp. 03-04.

Biblioteca Digital del ILCE. (2019). La Producción del Acero. Recuperado de: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/080/htm/sec_7.htm

QUITE, Alfonso. *Proceso de obtención del acero* [Entrada de blog]. [Consulta: 20 Julio 2019]. Recuperado de: <http://tecnologiasfa.blogspot.com/2009/02/proceso-de-obtencion-del-acero.html>

Ferrocortes. (2019). Guía y tablas técnicas de los aceros. Recuperado de: <http://www.ferrocortes.com.co/guia-y-tablas-tecnicas-de-los-aceros/>

Procesos de Manufactura. (2019). Proceso de Soldadura y Simbología. Recuperado de: <https://sites.google.com/site/procesosdemanufacturaetitic/tipos-de-procesos/proceso-de-soldadura>

RODRÍGUEZ, Osmundo H. *Metalurgia de la soldadura* [en línea]. La Habana – Cuba: Editorial Universitaria: ProQuest Ebook Central, 2013. [Consulta: 20 Julio 2019]. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/espochsp/detail.action?docID=3210020>.

GIACHINO, Joseph W. y WEEKS, William. *Técnica y práctica de la soldadura* [en línea]. Barcelona-España: Reverté, 1996. [Consulta: 15 Julio 2019]. Disponible en: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=JE2RK4QupuoC&oi=fnd&pg=PA1&dq=tecnica+y+practica+de+la+soldadura&ots=G7Ouf6S62k&sig=m8vJxKDSgSyIreUsv-fm61uqUjA#v=onepage&q=tecnica%20y%20practica%20de%20la%20soldadura&f=false>

SCHIMPEKE, Paúl; & HANS, Horn. *Tratado general de soldadura*. 6ª ed. Barcelona-España: Gustavo Gili, 1977. ISBN: 84-252-0286-8, pp. 01-02

LOVE, Carl. *Soldadura: Procedimientos y Aplicaciones*. México: Diana, 1981. ISBN: 968-13-0626-0, pp. 24-25

Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget (ESAB). (2019). Proceso de Soldadura – SMAW. Recuperado de: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>

FLORES, C.E. “Soldadura al arco eléctrico smaw”. [en línea], 2002, (08), pp. 1-12- [Consulta: 20 julio 2019]. Disponible en: http://www.fsalazar.bizland.com/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin08/URL_08_MEC01.pdf

Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget (ESAB). (2019). Biografía del fundador de ESAB. Recuperado de: <https://www.esab.es/es/sp/about/history/index.cfm>

AWS A 5.1. *Specification for Carbono Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding. Parte C: Manufacture, Identification, and Packaging.*

LINCOLN ELECTRIC. (2019). Especificación de Clasificaciones AWS. Recuperado de: <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/support/process-and-theory/Pages/aws-classifications-detail.aspx>

WEST ARC. (2019). Sistema de Clasificación de Electrodo AWS. Recuperado de: https://www.esabna.com/westarco/sp/education/blog/sistema_clasificacion_electrodos_aws.cfm

INDURA, (2011). Manual de sistemas y materiales de soldadura. Recuperado de: <http://www.indura.cl/Descargar/Manual%20de%20Soldadura%20INDURA?path=%2Fcontent%2Fstorage%2Fcl%2Fbiblioteca%2F00da6ac5e6754e428ecd94f1c78711cb.pdf>

ALTER, Luis; et al. *Corrosión y protección* [en línea]. Barcelona-España: Universidad Politécnica de Catalunya, 2003. [Consulta: 21 Julio 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/ZeocjBu>

NACE INTERNATIONAL THE CORROSION SOCIETY (2004, 15 de enero). Curso de corrosión básica. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/fernandacastro3701/corso-decorrosionbasiconaceespanol>

GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, J. *Teoría y práctica de la lucha en contra de la corrosión* [en línea]. Madrid-España: Grafimad, S.A., 1984. [Consultado: 21 de Julio 2019]. Disponible en: <https://cutt.ly/6eocl8z>

MACKAY et al. “La corrosión: La lucha más extensa”. *Oilfield Review* [en línea], 2016 (USA) 28(2), pp. 36-51. [Consulta: 22 Julio 2019]. Disponible en: <https://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/03-corrosion-spanish>

FERNÁNDEZ, Ramón; et al. *Corrosión* [en línea]. Valencia-España: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, 2018. [Consulta: 22 Julio 2019]. ISSN de libro electrónico 978-84-9048-728-0. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/epochsp/detail.action?docID=5635042>

HING, C.R. “Estudio del comportamiento corrosivo de algunos materiales metálicos en agua de mar” *Tecnología Química* [en línea], 2000, 20 (3), pp. 33-42. [Consulta: 22 Julio 2019]. ISSN de libro electrónico 0041-8420. Disponible en: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/espochsp/detail.action?docID=3187121>

SCHWEITZER, P. A. *Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 978-1-4200-6770-5, pp. 198-200)

SCHWEITZER, P. A. *Fundamentals of corrosion: mechanisms, causes, and preventative methods*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010. ISBN 978-1-4200-6770-5, pp. 309-310)

REVIE, Winston, & UHLIG, Herbert H. *Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering* [en línea]. USA: John Wiley & Sons, 2008. [Consulta: 24 Julio 2019]. ISBN 978-0-471-73279-2. Disponible en: https://www.academia.edu/37574818/Corrosion_and_Corrosion_Control_4th_Ed.pdf

GUTHRIE, et al. “Accelerated corrosion testing”. *The AMPTIAC Quarterly* [en línea]. 2000, 6(3), pp. 11-15. [Consulta: 23 Julio 2019]. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026057600804614>
<https://p2infohouse.org/ref/34/33145.pdf>

ØYSTEIN, K. O., & FORSGREN, A. *Corrosion Control Through Organic Coatings* [en línea]. 2da. Boca Raton: CRC Press, 2006. [Consulta: 24 Julio 2019]. ISBN 978-1-4987-6072-0. Disponible en: <http://materialstandard.com/wp-content/uploads/2019/07/Coatingbook.Corrosion-Control-through-organic.pdf>

ASTM B 117. *Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*. 2011.

ASTM G1. *Estándar Practice for Preparing, Cleaning and Evaluation Corrosion Test Specimens*. 2011.

ASTM E 165. *Metals Test Methods and Analytical Procedures*.

ANEXOS

ANEXO A: AGUA DESTILADA TIPO IV

		4 L.
NOVACHEM		
AGUA DESTILADA (Uso Múltiple)		
ANÁLISIS ACTUAL		
Norma INEN 1545	Dureza	Max 0.80 ppm
	Alcal. Total	Max 2.00 ppm
	STD	0.00 ppm
	pH	6-6.5
	Conductividad	Max 4.00 μ s/cm
	Silicie	Max 5.00 ppm
	Sabor Color	Excento
		Lote: 100817

ANEXO B: SAL ANALÍTICA

CAUTION! May causes eye and skin irritation. May causes respiratory tract irritation. May cause digestive tract irritation with nausea, vomiting, and diarrhea. **FIRST AID: EYES:** Gently lift eyelids and flush continuously with water. **SKIN:** Flush skin with plenty of soap and water. **INGESTION:** If victim is conscious and alert, give 2-4 capfuls of milk or water. **INHALATION:** Remove from exposure and move to fresh air immediately. Support breathing as needed. Get medical aid if irritation develops or persist. **IMPORTANT:** Do not use this product until Material Safety Data Sheet has been read and understood. **ATTENTION!** Risque de cause une irritation oculaire et cutanée. Risque de causer une irritation des voies respiratoires. Risque de causer une irritation des voies digestives accompagnée de nausée, vomissement et diarrhée. **PREMIERS SECOURS YEUX:** Soulever délicates les paupières et rincer sans arrêt avec de l'eau. **PEAU:** Rincer la peau avec beaucoup d'eau et de savon. **INGESTION:** Si la victime est consciente et éveillée, lui donner 2 à 4 tasses de lait ou des lieux d'exposition. Si nécessaire, entretenir la respiration. Si une irritation apparait ou persiste, obtenir des soins médicaux. **IMPORTANT:** Ne pas utiliser le produit avant d'avoir lu et compris la fiche signalétique.

Product of United States



1kg
S271-1
Sodium Chloride
Certified ACS
crystalline

Fisher Chemical

L-11620

G Storage Code Gray

Janssen Pharmaceuticaaan 3a
2440 Geel - Belgium
Tel. +32 14 57 52 11
www.fisher.co.uk

1 Reagent Lane
Fair Lawn, NJ 07410
Tel. (201) 796-7100
www.fishersci.com

 **Fisher Chemical**

Actual Lot Analysis

ASSAY	99.3%
BARIUM (Ba)	PASS TEST
BROMIDE	<0.01%
CALCIUM	0.002%
CHLORATE & NITRATE	<0.003%
HEAVY METALS (as Pb)	<5PPM
IDENTIFICATION	PASS TEST
INSOLUBLE MATTER	<0.005%
IODIDE	<0.002%
IRON (Fe)	<2PPM
MAGNESIUM	<0.001%
PH 5% SOLUTION @ 25 DEG C	6.1
PHOSPHATE (PO4)	<5PPM
POTASSIUM (K)	0.003%
SULFATE (SO4)	<0.004%

For laboratory and manufacturing use only, not for drug, food, or household use.

NaCl
CAS 7647-14-5

F.W. 58.44
LOT 186613

70
L-11620
U

G Storage Code Gray

ANEXO C: INFORME DE LA MEDICIÓN DEL PH



Centro de Fomento Productivo
Metalmecánico Carrocero



LABORATORIO DE ENSAYOS CLIMATICOS Y TRATAMIENTOS
TERMICOS
REPORTE DE CONDICIONES DE ENSAYO DE CORROSIÓN
INFORME DE RESULTADOS N°: 050315802420190520-ENS

DATOS GENERALES

DATOS INFORMATIVOS:

N° de proforma: TT_2019_003

Empresa / Cliente: Kevin Anderson Lema Aguaiza / Carlos Efraín Rea Gavilán

RUC/C.I.: 0503158024

Ciudad: Riobamba

Dirección: Niño de Isinche y Alejandrino Yangüés, Pujilí.

Teléfono: 0984904290

Correo: kevin_joset13@hotmail.com

DATOS DEL ENSAYO:

Lugar de Ejecución de Ensayo: Laboratorio de Tratamientos térmicos y ensayos climáticos.

Dirección del Laboratorio: Ambato/Catiglata. Toronto y Río de Janeiro.

Método de ensayo: ASTM B117-16 Práctica estándar para el funcionamiento del equipo de niebla salina (niebla).

Numero de probetas: 120.

Número de horas de ensayo: 510 horas.

Volumen de la solución: 250 litros.

Caudal: 0,5 l/h

Cantidad de Sal utilizada: 13,25 Kg.

Equipo utilizado: Cámara de niebla salina Modelo: SSC-400 N° de fabricación: 3477/14

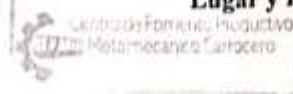
Fecha de Inicio de Ensayo: 2019/07/24 Fecha de Finalización de Ensayo: 2019/08/15

El presente reporte corresponde al monitoreo de las condiciones de ensayo realizado una vez al día durante el transcurso de horas que permaneció el ensayo, excepto los días sábados, domingos y feriados.

Observaciones: El primer lote se retiró de la Cámara de Niebla Salina a 120 horas de ensayo, el siguiente a 200 horas de ensayo y posterior a ello a 300, 400 y 510 horas de ensayo.

Elaborado por:		Aprobado por:
Ing. Fernando Galarza Mg.	Ing. Fernando Tibán R.	Ing. Jorge Rodas MEng.
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Lugar y fecha de emisión de Informe: Ambato, 17 de diciembre de 2019.
N°. Factura: 001-002-000007076.



Código: RG-TT-006
Fecha de Elaboración: 2019-09-17
Fecha de última aprobación: 2019-09-18
Revisión: 1

REPORTE DE CONDICIONES DE ENSAYO DE
CORROSIÓN

Página 1 de 3



Equipo Utilizado				
Nº	Parámetro	Equipo	Modelo	Serie
1	Conductividad	Conductímetro	EC59	1313447
2	Temperatura de la solución recolectada	Medidor de PI/ORP	HI9125	E0016479
3	Volumen de la solución recolectada	Fluviómetro	100 ml	-
4	Valor de pH de la solución recolectada	Medidor de PH/ORP	HI9125	E0016479
5	Gravedad específica de la Sol. Recolectada	Refractómetro	MA887	03160251991

Nº	Ítem	Parámetro	Unidad	Valor Requerido	Valor Medido
1	Agua Desmineralizada	Conductividad	($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1,0- 5,0	2
2		Sólidos en suspensión:	ppm	0	0
4	Solución Salina	Valor pH	pH.	< 6,5	6,21
5		Temperatura	°C	23±3	22,5
6		Gravedad Específica	(g/cm^3)	5% a 23°C (1,031458)	1,033

PARÁMETROS						
Fecha	Hora	Temperatura de la cuba (°C).	Temperatura de solución recolectada (°C).	Volumen de solución recolectada (ml).	pH de solución recolectada.	Gravedad específica de la Sol. Recolectada (S.G.).
2019-07-25	16:05	35,1	20,5	53	7,23	1,033
2019-07-26	16:08	34,9	23,5	10	6,38	1,032
2019-07-27	Sábado					
2019-07-28	Domingo					
2019-07-29	16:03	34,9	22,5	11	6,74	1,033
2019-07-30	16:02	35,3	21,6	50	7,04	1,033
2019-07-31	16:05	34,8	20,3	56	7,19	1,033
2019-08-01	16:01	35,1	21,4	41	6,86	1,033
2019-08-02	16:04	34,9	21,0	47	7,16	1,032
2019-08-03	Sábado					
2019-08-04	Domingo					
2019-08-05	16:05	35,0	21,1	59	7,20	1,031
2019-08-06	16:06	35,1	20,8	48	7,85	1,032
2019-08-07	16:03	35,2	21,5	22	7,87	1,032
2019-08-08	16:03	35,1	21,7	24	7,54	1,033
2019-08-09	16:02	35,1	21,2	24	7,62	1,033
2019-08-10	Sábado					
2019-08-11	Domingo					
2019-08-12	16:05	35,1	21,5	18	7,58	1,033
2019-08-13	16:03	35,2	21,8	28	7,55	1,034
2019-08-14	16:01	35,1	21,7	25	7,55	1,032



Nº	Interrupciones durante el periodo de exposición /Causa	Fecha	Hora	Tiempo (horas)
1	Interrupción de la cámara de niebla salina (CNS) debido a que se retira el primer lote luego de haber cumplido 120 horas de exposición.	2019/07/29	13:00	0,25
2	Interrupción de la CNS debido a que se retira el segundo lote luego de haber cumplido 200 horas de exposición.	2019/08/02	09:00	0,25
3	Interrupción de la CNS debido a que se retira el tercer lote luego de haber cumplido 300 horas de exposición.	2019/08/06	09:00	0,25
4	Interrupción de la CNS debido a que se retira el cuarto lote luego de haber cumplido 400 horas de exposición.	2019/08/12	08:00	0,25
5	Interrupción de la CNS debido a que se retira el quinto lote luego de haber cumplido 500 horas de exposición.	2019/08/14	16:00	0,25

ANEXO D: DESOXIDANTE ERCO



Clinox

Limpiador para Acero Inoxidable
Remueve manchas y óxido

-  Elimina manchas
-  Remueve el óxido
-  Recupera el brillo natural

MODO DE USO:
Aplique sobre la superficie. Deje actuar de 5 a 10 minutos.
Remueva con trapo húmedo o agua y seque.

PRECAUCIÓN:
Evite el contacto con ojos y piel. Use equipo de protección personal: gafas y guantes.

USO INDUSTRIAL
Contenido: 1 Galón

Fabricado por:
Químicos Erco S.A.S.
www.quimicoerco.com

ANEXO E: INFORME DE CORROSIÓN



**LABORATORIO DE ENSAYOS CLIMATICOS Y TRATAMIENTOS
TERMICOS
ENSAYO DE NIEBLA SALINA NEUTRA
INFORME DE RESULTADOS N°: 180434943720190107**

DATOS GENERALES

DATOS INFORMATIVOS:
 N° de proforma: TT_2019_010
 Empresa / Cliente: Sr. Kevin Anderson Lema Aguaiza / Sr. Carlos Efraín Rea Gavilán
 RUC/C.I.: 050315802-4 Ciudad: Riobamba
 Dirección: Av. 11 de noviembre y Juan Salinas
 Teléfono: 0984904290 Correo: kevin_joset13@hotmail.com

DATOS DEL ENSAYO:
 Lugar de Ejecución del Ensayo: Laboratorio de Tratamientos térmicos y ensayos climáticos.
 Dirección del Laboratorio: Ambato/Catiglata, Toronto y Río de Janeiro.
 Método de ensayo: ASTM B117-16 Práctica estándar para el funcionamiento del equipo de niebla salina (niebla).
 Especificación del producto: Acero ASTM A36 y Acero SA 516 grado 70
 Evaluación de la conformidad: Sin recubrimiento sobre el acero.
 Equipo utilizado: Cámara de niebla salina Modelo: SSC-400 N° de fabricación: 3477/14
 Fecha de Inicio de Ensayo: 2019/07/24 Fecha de Finalización de Ensayo: 2019/08/15
 Los resultados obtenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en materiales metálicos sin recubrimiento de pintura. Las probetas fueron recibidas en el Laboratorio de Ensayos climáticos y tratamientos térmicos del CFPMC del H.G.P. Tungurahua.
Configuración del Ensayo:
 Cloruro sódico: (5 ± 1) partes de masa Agua destilada: 95 partes de masa
 pH de la solución: 6,5 – 7,2 Duración del ensayo: 510 horas
 Temperatura del ensayo: (35 ± 2) °C Cambios en la posición de las probetas: No
Colocación de las probetas: Las probetas se colocan en el interior de la cámara de ensayo en una posición tal que mantienen un ángulo entre 15° y 30° respecto a la vertical.
Limpieza de las probetas: Una vez realizado el ensayo y antes de su evaluación las probetas se lavan con agua de red y se pulveriza con aire comprimido, posterior se ingresan en el horno a una temperatura de 45°C por un tiempo de permanencia de 30 min. Por último, se realiza una limpieza final mediante un desoxidante químico orgánico, para su posterior medición de peso.
Observaciones: El primer lote se retiró de la Cámara de Niebla Salina a 120 horas de ensayo, el siguiente a 200 horas de ensayo y posterior a ello a 300, 400 y 510 horas de ensayo. Las condiciones iniciales del ensayo y durante el transcurso del ensayo de corrosión se encuentran reportadas en el informe 050315802420190520-ENS.

Elaborado por:	Aprobado por:	
Ing. Fernando Galarza Mg.	Ing. Fernando Tibán R.	Ing. Jorge Rodas MEng.
Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Analista Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC	Director Técnico Área de Ensayos e Inspecciones CFPMC

Lugar y fecha de emisión de Informe: Ambato, 17 de diciembre de 2019.
N°. Factura: 001-002-000008581



OBJETOS DE ENSAYO

N°	I. del grupo	Proceso Soldadura	Tipo de Limpieza	Recubrimiento	N° Probetas
1	A36PSPC	SMAW - E6011	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
2	A36PCPC	SMAW - E6011	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
3	A36PSSPC	SMAW - E6011	Mecánica-Grata	Sin recubrimiento	15
4	A36PSCPC	SMAW - E6011	Mecánica-Grata	Sin recubrimiento	15
5	A516PSPC	SMAW - E6011	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
6	A516PCPC	SMAW - E6011	Manual-Desengrasante	Sin recubrimiento	15
7	A516PSSPC	SMAW - E6013	Mecánica - Grata	Sin recubrimiento	15
8	A516PSCPC	SMAW - E6013	Mecánica - Grata	Sin recubrimiento	15
TOTAL					120

Nota: La fabricación de las probetas y su configuración, están de acuerdo según especificaciones declaradas por el cliente.





Designation: B117 – 11

Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation B117; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This practice covers the apparatus, procedure, and conditions required to create and maintain the salt spray (fog) test environment. Suitable apparatus which may be used is described in [Appendix X1](#).

1.2 This practice does not prescribe the type of test specimen or exposure periods to be used for a specific product, nor the interpretation to be given to the results.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values given in parentheses are for information only.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

B368 Test Method for Copper-Accelerated Acetic Acid-Salt Spray (Fog) Testing (CASS Test)

D609 Practice for Preparation of Cold-Rolled Steel Panels for Testing Paint, Varnish, Conversion Coatings, and Related Coating Products

D1193 Specification for Reagent Water

D1654 Test Method for Evaluation of Painted or Coated Specimens Subjected to Corrosive Environments

E70 Test Method for pH of Aqueous Solutions With the Glass Electrode

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

G85 Practice for Modified Salt Spray (Fog) Testing

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved Oct. 1, 2011. Published November 2011. Originally approved in 1939. Last previous edition approved in 2009 as B117-09. DOI: 10.1520/B0117-11.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

3. Significance and Use

3.1 This practice provides a controlled corrosive environment which has been utilized to produce relative corrosion resistance information for specimens of metals and coated metals exposed in a given test chamber.

3.2 Prediction of performance in natural environments has seldom been correlated with salt spray results when used as stand alone data.

3.2.1 Correlation and extrapolation of corrosion performance based on exposure to the test environment provided by this practice are not always predictable.

3.2.2 Correlation and extrapolation should be considered only in cases where appropriate corroborating long-term atmospheric exposures have been conducted.

3.3 The reproducibility of results in the salt spray exposure is highly dependent on the type of specimens tested and the evaluation criteria selected, as well as the control of the operating variables. In any testing program, sufficient replicates should be included to establish the variability of the results. Variability has been observed when similar specimens are tested in different fog chambers even though the testing conditions are nominally similar and within the ranges specified in this practice.

4. Apparatus

4.1 The apparatus required for salt spray (fog) exposure consists of a fog chamber, a salt solution reservoir, a supply of suitably conditioned compressed air, one or more atomizing nozzles, specimen supports, provision for heating the chamber, and necessary means of control. The size and detailed construction of the apparatus are optional, provided the conditions obtained meet the requirements of this practice.

4.2 Drops of solution which accumulate on the ceiling or cover of the chamber shall not be permitted to fall on the specimens being exposed.

4.3 Drops of solution which fall from the specimens shall not be returned to the solution reservoir for respraying.

4.4 Material of construction shall be such that it will not affect the corrosiveness of the fog.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2998, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved);

4.5 All water used for this practice shall conform to Type IV water in Specification D1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). This does not apply to running tap water. All other water will be referred to as reagent grade.

5. Test Specimens

5.1 The type and number of test specimens to be used, as well as the criteria for the evaluation of the test results, shall be defined in the specifications covering the material or product being exposed or shall be mutually agreed upon between the purchaser and the seller.

6. Preparation of Test Specimens

6.1 Specimens shall be suitably cleaned. The cleaning method shall be optional depending on the nature of the surface and the contaminants. Care shall be taken that specimens are not recontaminated after cleaning by excessive or careless handling.

6.2 Specimens for the evaluation of paints and other organic coatings shall be prepared in accordance with applicable specification(s) for the material(s) being exposed, or as agreed upon between the purchaser and the supplier. Otherwise, the test specimens shall consist of steel meeting the requirements of Practice D609 and shall be cleaned and prepared for coating in accordance with the applicable procedure of Practice D609.

6.3 Specimens coated with paints or nonmetallic coatings shall not be cleaned or handled excessively prior to test.

6.4 Whenever it is desired to determine the development of corrosion from an abraded area in the paint or organic coating, a scratch or scribed line shall be made through the coating with a sharp instrument so as to expose the underlying metal before testing. The conditions of making the scratch shall be as defined in Test Method D1654, unless otherwise agreed upon between the purchaser and the seller.

6.5 Unless otherwise specified, the cut edges of plated, coated, or duplex materials and areas containing identification marks or in contact with the racks or supports shall be protected with a suitable coating stable under the conditions of the practice.

NOTE 1—Should it be desirable to cut test specimens from parts or from preplated, painted, or otherwise coated steel sheet, the cut edges shall be protected by coating them with paint, wax, tape, or other effective media so that the development of a galvanic effect between such edges and the adjacent plated or otherwise coated metal surfaces, is prevented.

7. Position of Specimens During Exposure

7.1 The position of the specimens in the salt spray chamber during the test shall be such that the following conditions are met:

7.1.1 Unless otherwise specified, the specimens shall be supported or suspended between 15 and 30° from the vertical and preferably parallel to the principal direction of flow of fog through the chamber, based upon the dominant surface being tested.

7.1.2 The specimens shall not contact each other or any metallic material or any material capable of acting as a wick.

7.1.3 Each specimen shall be placed to permit unencumbered exposure to the fog.

7.1.4 Salt solution from one specimen shall not drip on any other specimen.

NOTE 2—Suitable materials for the construction or coating of racks and supports are glass, rubber, plastic, or suitably coated wood. Bare metal shall not be used. Specimens shall preferably be supported from the bottom or the side. Slotted wooden strips are suitable for the support of flat panels. Suspension from glass hooks or waxed string may be used as long as the specified position of the specimens is obtained, if necessary by means of secondary support at the bottom of the specimens.

8. Salt Solution

8.1 The salt solution shall be prepared by dissolving 5 ± 1 parts by mass of sodium chloride in 95 parts of water conforming to Type IV water in Specification D1193 (except that for this practice limits for chlorides and sodium may be ignored). Careful attention should be given to the chemical content of the salt. The salt used shall be sodium chloride with not more than 0.3 % by mass of total impurities. Halides (Bromide, Fluoride, and Iodide) other than Chloride shall constitute less than 0.1 % by mass of the salt content. Copper content shall be less than 0.3 ppm by mass. Sodium chloride that has had anti-caking agents added shall not be used because such agents may act as corrosion inhibitors. See Table 1 for a listing of these impurity restrictions. Upon agreement between the purchaser and the seller, analysis may be required and limits established for elements or compounds not specified in the chemical composition given above.

8.2 The pH of the salt solution shall be such that when atomized at 35°C (95°F) the collected solution will be in the pH range from 6.5 to 7.2 (*NOTE 3*). Before the solution is atomized it shall be free of suspended solids (*NOTE 4*). The pH measurement shall be made at $23 \pm 3^\circ\text{C}$ ($73 \pm 5^\circ\text{F}$) using a suitable glass pH-sensing electrode, reference electrode, and pH meter system in accordance with Test Method E70. pH measurement shall be recorded once daily (except on weekends, or holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir. The maximum interval between pH measurements shall not exceed 96 h). Only diluted, reagent grade hydrochloric acid (HCl) or reagent grade sodium hydroxide (NaOH) shall be used to adjust the pH.

NOTE 3—Temperature affects the pH of a salt solution prepared from water saturated with carbon dioxide at room temperature and pH adjustment may be made by the following three methods:

(1) When the pH of a salt solution is adjusted at room temperature, and atomized at 35°C (95°F), the pH of the collected solution will be higher than the original solution due to the loss of carbon dioxide at the higher temperature. When the pH of the salt solution is adjusted at room temperature, it is therefore necessary to adjust it below 6.5 so the collected solution after atomizing at 35°C (95°F) will meet the pH limits of 6.5 to 7.2. Take about a 50-mL sample of the salt solution as prepared at room temperature, boil gently for 30 s, cool, and determine the pH. When the pH of the salt solution is adjusted to 6.5 to 7.2 by this procedure, the pH of the atomized and collected solution at 35°C (95°F) will come within this range.

(2) Heating the salt solution to boiling and cooling to 35°C (95°F) and maintaining it at 35°C (95°F) for approximately 48 h before adjusting the pH produces a solution the pH of which does not materially change when

TABLE 1 Maximum Allowable Limits for Impurity Levels in Sodium Chloride^{A,B,C}

NOTE 1—A measurable limit for anti-caking agents is not being defined as a result of how salt is manufactured. During salt manufacturing, it is common practice to create salt slurry from the raw salt mined. A crystallization process then captures the pure salt from this slurry. Some naturally occurring anti-caking agents can be formed in this process and are not removed from the resultant product. Avoid salt products where extra anti-caking agents are added. Additionally, when doing an elemental analysis of salt, there can be trace elements present that are either a stand-alone element or part of an anti-caking agent. It is not economically feasible to know where such elements came from due to the long list of possible anti-caking agents for which there would have to be testing. Therefore, a salt product that meets the impurity, halide, and copper limits with no anti-caking agents added will be acceptable. The salt supplier can provide an analysis of the salt with a statement indicating that anti-caking agents were not added to the product.

Impurity Description	Allowable Amount
Total Impurities	≤ 0.3 %
Halides (Bromide, Fluoride and Iodide) excluding Chloride	< 0.1 %
Copper	< 0.3 ppm
Anti-caking Agents	None Added

^A A common formula used to calculate the amount of salt required by mass to achieve a 5 % salt solution of a known mass of water is:

$$0.053 \times \text{Mass of Water} = \text{Mass of NaCl required}$$

The mass of water is 1 g per 1 mL. To calculate the mass of salt required in grams to mix 1 L of a 5 % salt solution, multiply 0.053 by 1000 g (35.27 oz, the mass of 1 L of water). This formula yields a result of 53 g (1.87 oz) of NaCl required for each litre of water to achieve a 5 % salt solution by mass.

The 0.053 multiplier for the sodium chloride used above is derived by the following:

1000 g (mass of a full L of water) divided by 0.95 (water is only 95 % of the total mixture by mass) yields 1053 g

This 1053 g is the total mass of the mixture of one L of water with a 5% sodium chloride concentration. 1053 g minus the original weight of the L of water, 1000 g, yields 53 g for the weight of the sodium chloride. 53 g of total sodium chloride divided by the original 1000 g of water yields a 0.053 multiplier for the sodium chloride.

As an example: to mix the equivalent of 200 L (52.83 gal) of 5 % sodium chloride solution, mix 10.6 kg (23.37 lb) of sodium chloride into 200 L (52.83 gal) of water. 200 L of water weighs 200 000 g. 200 000 g of water × 0.053 (sodium chloride multiplier) = 10 600 g of sodium chloride, or 10.6 kg.

^B In order to ensure that the proper salt concentration was achieved when mixing the solution, it is recommended that the solution be checked with either a salimeter hydrometer or specific gravity hydrometer. When using a salimeter hydrometer, the measurement should be between 4 and 6 % at 25°C (77°F).

^C If the purity of the salt used is >99.9%, then the limits for halides can be ignored. This is due to the fact that the halides cannot be ≥0.1% with a salt purity of >99.9%. If the salt used is of lower purity, then test for halides.

atomized at 35°C (95°F).

(3) Heating the water from which the salt solution is prepared to 35°C (95°F) or above, to expel carbon dioxide, and adjusting the pH of the salt solution within the limits of 6.5 to 7.2 produces a solution the pH of which does not materially change when atomized at 35°C (95°F).

NOTE 4—The freshly prepared salt solution may be filtered or decanted before it is placed in the reservoir, or the end of the tube leading from the solution to the atomizer may be covered with a double layer of cheesecloth to prevent plugging of the nozzle.

NOTE 5—The pH can be adjusted by additions of dilute ACS reagent grade hydrochloric acid or sodium hydroxide solutions.

9. Air Supply

9.1 The compressed air supply to the Air Saturator Tower shall be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. (NOTE 6) This air should be maintained at a sufficient pressure at the base of the Air

TABLE 2 Suggested Temperature and Pressure Guideline for the Top of the Air Saturator Tower for the Operation of a Test at 35°C (95°F)

Air Pressure, kPa	Temperature, °C	Air Pressure, psi	Temperature, °F
83	46	12	114
96	47	14	117
110	48	16	119
124	49	18	121

Saturator Tower to meet the suggested pressures of Table 2 at the top of the Air Saturator Tower.

NOTE 6—The air supply may be freed from oil and dirt by passing it through a suitable oil/water extractor (that is commercially available) to stop any oil from reaching the Air Saturator Tower. Many oil/water extractors have an expiration indicator; proper preventive maintenance intervals should take these into account.

9.2 The compressed air supply to the atomizer nozzle or nozzles shall be conditioned by introducing it into the bottom of a tower filled with water. A common method of introducing the air is through an air dispersion device (X1.4.1). The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. It is common practice to maintain the temperature in this tower between 46 and 49°C (114–121°F) to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure during the atomization process. Table 2 shows the temperature, at different pressures, that are commonly used to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

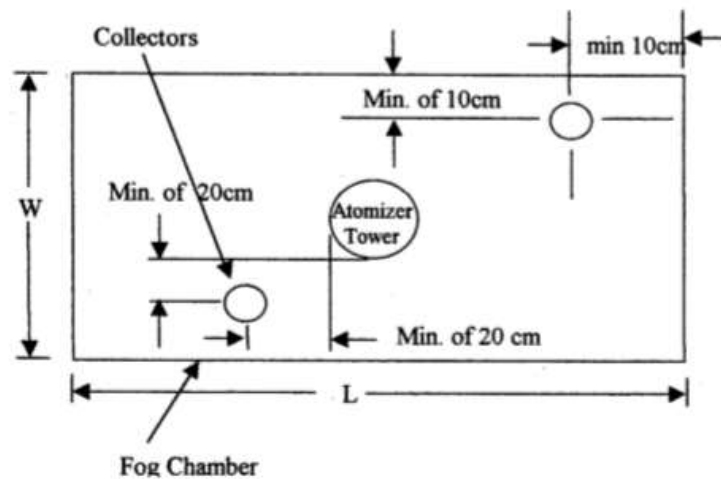
9.3 Careful attention should be given to the relationship of tower temperature to pressure since this relationship can have a direct impact to maintaining proper collection rates (NOTE 7). It is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog as listed in Table 2.

NOTE 7—If the tower is run outside of these suggested temperature and pressure ranges to achieve proper collection rates as described in 10.2 of this practice, other means of verifying the proper corrosion rate in the chamber should be investigated, such as the use of control specimens (panels of known performance in the test conducted). It is preferred that control panels be provided that bracket the expected test specimen performance. The controls allow for the normalization of test conditions during repeated running of the test and will also allow comparisons of test results from different repeats of the same test. (Refer to Appendix X3, Evaluation of Corrosive Conditions, for mass loss procedures).

10. Conditions in the Salt Spray Chamber

10.1 *Temperature*—The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at 35 ± 2°C (95 ± 3°F). Each set point and its tolerance represents an operational control point for equilibrium conditions at a single location in the cabinet which may not necessarily represent the uniformity of conditions throughout the cabinet. The temperature within the exposure zone of the closed cabinet shall be recorded (NOTE 8) at least once daily (except on Saturdays, Sundays, and holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir)

NOTE 8—A suitable method to record the temperature is by a continuous recording device or by a thermometer which can be read from outside the closed cabinet. The recorded temperature must be obtained with the



NOTE 1—This figure shows a typical fog collector arrangement for a single atomizer tower cabinet. The same fog collector arrangement is also applicable for multiple atomizer tower and horizontal (“T” type) atomizer tower cabinet constructions as well.

FIG. 1 Arrangement of Fog Collectors

salt spray chamber closed to avoid a false low reading because of wet-bulb effect when the chamber is open.

10.2 *Atomization and Quantity of Fog*—Place at least two clean fog collectors per atomizer tower within the exposure zone so that no drops of solution will be collected from the test specimens or any other source. Position the collectors in the proximity of the test specimens, one nearest to any nozzle and the other farthest from all nozzles. A typical arrangement is shown in Fig. 1. The fog shall be such that for each 80 cm² (12.4 in.²) of horizontal collecting area, there will be collected from 1.0 to 2.0 mL of solution per hour based on an average run of at least 16 h (Note 9). The sodium chloride concentration of the collected solution shall be 5 ± 1 mass % (Notes 9-11). The pH of the collected solution shall be 6.5 to 7.2. The pH measurement shall be made as described in 8.2 (Note 3). Both sodium chloride concentration (measured as specific gravity) and volume of condensate collected (measured in mL) shall be recorded once daily (except on weekends, or holidays when the salt spray test is not interrupted for exposing, rearranging, or removing test specimens or to check and replenish the solution in the reservoir. The maximum interval between these data collection measurements shall not exceed 96 h).

NOTE 9—Suitable collecting devices are glass or plastic funnels with the stems inserted through stoppers into graduated cylinders, or crystallizing dishes. Funnels and dishes with a diameter of 10 cm (3.94 in.) have an area of about 80 cm² (12.4 in.²).

NOTE 10—The specific gravity of salt solution will change with temperature. Table 3 shows salt concentration and density versus temperature³ and can be used to determine if the sample measured is within specification. The sample to be measured may be a composite sample from

³ “Thermodynamic Properties of the NaCl + H₂O system II. Thermodynamic Properties of NaCl(aq), NaCl·2H₂O(cr), and Phase Equilibria,” *Journal of Physics and Chemistry Reference Data*, Vol. 21, No. 4, 1992.

multiple fog-collecting devices within a single cabinet, if necessary, to obtain sufficient solution volume for measurement.

Table 3 shows the salt concentration and salt density of 4%, 5% and 6% salt solution between 20°C and 40°C. A measurement that falls within the range between 4% and 6% is acceptable.

It is important to understand the equipment being used to measure specific gravity. One common practice for specific gravity measurement is the use of a hydrometer. If used, careful attention to the hydrometer type is important as most are manufactured and calibrated for measurements at 15.6°C (60°F). Since salt density is temperature dependent, an offset will be necessary to make an accurate measurement at other temperatures. Contact the hydrometer manufacturer to find the proper offset for the hydrometer being used.

NOTE 11—Salt solutions from 2 to 6% will give the same results, though for uniformity the limits are set at 4 to 6%.

10.3 The nozzle or nozzles shall be so directed or baffled that none of the spray can impinge directly on the test specimens.

II. Continuity of Exposure

11.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, the test shall be continuous for the duration of the entire test period. Continuous operation implies that the chamber be closed and the spray operating continuously except for the short daily interruptions necessary to inspect, rearrange, or remove test specimens, to check and replenish the solution in the reservoir, and to make necessary recordings as described in Section 10.

NOTE 12—Operations should be so scheduled that the cumulative maximum time for these interruptions are held to 60 min or less per day. It is recommended to have only one interruption per day if possible. If interruption time is longer than 60 min, it should be noted in the test report.

12. Period of Exposure

12.1 The period of exposure shall be as designated by the specifications covering the material or product being tested or as mutually agreed upon between the purchaser and the seller.

TABLE 3 Temperature versus Density Data

Temperature °C (°F)	Density, g/cm ³		
	4-percent Salt Concentration	5-percent Salt Concentration	6-percent Salt Concentration
20 (68)	1.025758	1.032360	1.038867
21 (69.8)	1.025480	1.032067	1.038560
22 (71.6)	1.025193	1.031766	1.038245
23 (73.4)	1.024899	1.031458	1.037924
24 (75.2)	1.024596	1.031142	1.037596
25 (77)	1.024286	1.030819	1.037261
26 (78.8)	1.023969	1.030489	1.036919
27 (80.6)	1.023643	1.030152	1.036570
28 (82.4)	1.023311	1.029808	1.036215
29 (84.2)	1.022971	1.029457	1.035853
30 (86)	1.022624	1.029099	1.035485
31 (87.8)	1.022270	1.028735	1.035110
32 (89.6)	1.021910	1.028364	1.034729
33 (91.4)	1.021542	1.027986	1.034343
34 (93.2)	1.021168	1.027602	1.033950
35 (95)	1.020787	1.027212	1.033551
36 (96.8)	1.020399	1.026816	1.033146
37 (98.6)	1.020006	1.026413	1.032735
38 (100.4)	1.019605	1.026005	1.032319
39 (102.2)	1.019199	1.025590	1.031897
40 (104)	1.018786	1.025170	1.031469

NOTE 13—Recommended exposure periods are to be as agreed upon between the purchaser and the seller, but exposure periods of multiples of 24 h are suggested.

13. Cleaning of Tested Specimens

13.1 Unless otherwise specified in the specifications covering the material or product being tested, specimens shall be treated as follows at the end of the test:

13.1.1 The specimens shall be carefully removed.

13.2 Specimens may be gently washed or dipped in clean running water not warmer than 38°C (100°F) to remove salt deposits from their surface, and then immediately dried.

14. Evaluation of Results

14.1 A careful and immediate examination shall be made as required by the specifications covering the material or product being tested or by agreement between the purchaser and the seller.

15. Records and Reports

15.1 The following information shall be recorded, unless otherwise prescribed in the specifications covering the material or product being tested:

15.1.1 Type of salt and water used in preparing the salt solution.

15.1.2 All readings of temperature within the exposure zone of the chamber.

15.1.3 Data obtained from each fog-collecting device of volume of salt solution collected in millilitres per hour per 80 cm² (12.4 in.²).

15.1.4 Concentration or specific gravity of collected solution and the temperature of that solution when measured. Follow Table 3 for salt concentration and density versus

temperature to determine that the sample measured is within specification. Sample to be measured may be a composite sample from multiple fog-collecting devices (within a single cabinet), if necessary to obtain sufficient solution volume for measurement.

15.1.5 pH of collected solution at 23 ± 3°C (73 ± 5°F). Sample to be measured may be a composite sample from multiple fog-collecting devices (within a single cabinet), if necessary to obtain sufficient solution volume for measurement.

15.2 Type of specimen and its dimensions, or number or description of part,

15.3 Method of cleaning specimens before and after testing,

15.4 Method of supporting or suspending article in the salt spray chamber,

15.5 Description of protection used as required in 6.5,

15.6 Exposure period,

15.7 Interruptions in exposure, cause, and length of time, and

15.8 Results of all inspections.

NOTE 14—If any of the atomized salt solution which has not contacted the test specimens is returned to the reservoir, it is advisable to record the concentration or specific gravity of this solution also.

16. Keywords

16.1 controlled corrosive environment; corrosive conditions; determining mass loss; salt spray (fog) exposure

XI. CONSTRUCTION OF APPARATUS

XI.1 Cabinets

XI.1.1 Standard salt spray cabinets are available from several suppliers, but certain pertinent accessories are required before they will function according to this practice and provide consistent control for duplication of results.

XI.1.2 The salt spray cabinet consists of the basic chamber, an air-saturator tower, a salt solution reservoir, atomizing nozzles, specimen supports, provisions for heating the chamber, and suitable controls for maintaining the desired temperature.

XI.1.3 Accessories such as a suitable adjustable baffle or central fog tower, automatic level control for the salt reservoir, and automatic level control for the air-saturator tower are pertinent parts of the apparatus.

XI.1.4 The size and shape of the cabinet shall be such that the atomization and quantity of collected solution is within the limits of this practice.

XI.1.5 The chamber shall be made of suitably inert materials such as plastic, glass, or stone, or constructed of metal and lined with impervious plastics, rubber, or epoxy-type materials or equivalent.

XI.1.6 All piping that contacts the salt solution or spray should be of inert materials such as plastic. Vent piping should be of sufficient size so that a minimum of back pressure exists and should be installed so that no solution is trapped. The exposed end of the vent pipe should be shielded from extreme air currents that may cause fluctuation of pressure or vacuum in the cabinet.

XI.2 Temperature Control

XI.2.1 The maintenance of temperature within the salt chamber can be accomplished by several methods. It is generally desirable to control the temperature of the surroundings of the salt spray chamber and to maintain it as stable as possible. This may be accomplished by placing the apparatus in a constant-temperature room, but may also be achieved by surrounding the basic chamber of a jacket containing water or air at a controlled temperature.

XI.2.2 The use of immersion heaters in an internal salt solution reservoir or within the chamber is detrimental where heat losses are appreciable because of solution evaporation and radiant heat on the specimens.

XI.3 Spray Nozzles

XI.3.1 Satisfactory nozzles may be made of hard rubber, plastic, or other inert materials. The most commonly used type

is made of plastic. Nozzles calibrated for air consumption and solution-atomized are available. The operating characteristics of a typical nozzle are given in Table X1.1.

XI.3.2 It can readily be seen that air consumption is relatively stable at the pressures normally used, but a marked reduction in solution sprayed occurs if the level of the solution is allowed to drop appreciably during the test. Thus, the level of the solution in the salt reservoir must be maintained automatically to ensure uniform fog delivery during the test.⁴

XI.3.3 If the nozzle selected does not atomize the salt solution into uniform droplets, it will be necessary to direct the spray at a baffle or wall to pick up the larger drops and prevent them from impinging on the test specimens. Pending a complete understanding of air-pressure effects, and so forth, it is important that the nozzle selected shall produce the desired condition when operated at the air pressure selected. Nozzles are not necessarily located at one end, but may be placed in the center and can also be directed vertically up through a suitable tower.

XI.4 Air for Atomization

XI.4.1 The air used for atomization must be free of grease, oil, and dirt before use by passing through well-maintained filters. Room air may be compressed, heated, humidified, and washed in a water-sealed rotary pump if the temperature of the water is suitably controlled. Otherwise cleaned air may be introduced into the bottom of a tower filled with water through a porous stone or multiple nozzles. The level of the water must be maintained automatically to ensure adequate humidification. A chamber operated in accordance with this method and Appendix X1 will have a relative humidity between 95 and 98 %. Since salt solutions from 2 to 6 % will give the same results (though for uniformity the limits are set at 4 to 6 %), it is preferable to saturate the air at temperatures well above the chamber temperature as insurance of a wet fog. Table X1.2 shows the temperatures, at different pressures, that are required to offset the cooling effect of expansion to atmospheric pressure.

XI.4.2 Experience has shown that most uniform spray chamber atmospheres are obtained by increasing the atomizing air temperature sufficiently to offset heat losses, except those that can be replaced otherwise at very low-temperature gradients.

⁴ A suitable device for maintaining the level of liquid in either the saturator tower or reservoir of test solution may be designed by a local engineering group, or it may be purchased from manufacturers of test cabinets as an accessory.

X1.5 Types of Construction

X1.5.1 A modern laboratory cabinet is shown in Fig. X1.1. Walk-in chambers are usually constructed with a sloping ceiling. Suitably located and directed spray nozzles avoid ceiling accumulation and drip. Nozzles may be located at the ceiling, or 0.91 m (3 ft) from the floor directed upward at 30 to 60° over a passageway. The number of nozzles depends on type and capacity and is related to the area of the test space. An 11 to 19 L (3 to 5-gal) reservoir is required within the chamber, with the level controlled. The major features of a walk-in type cabinet, which differs significantly from the laboratory type, are illustrated in Fig. X1.2. Construction of a plastic nozzle, such as is furnished by several suppliers, is shown in Fig. X1.3.

TABLE X1.1 Operating Characteristics of Typical Spray Nozzle

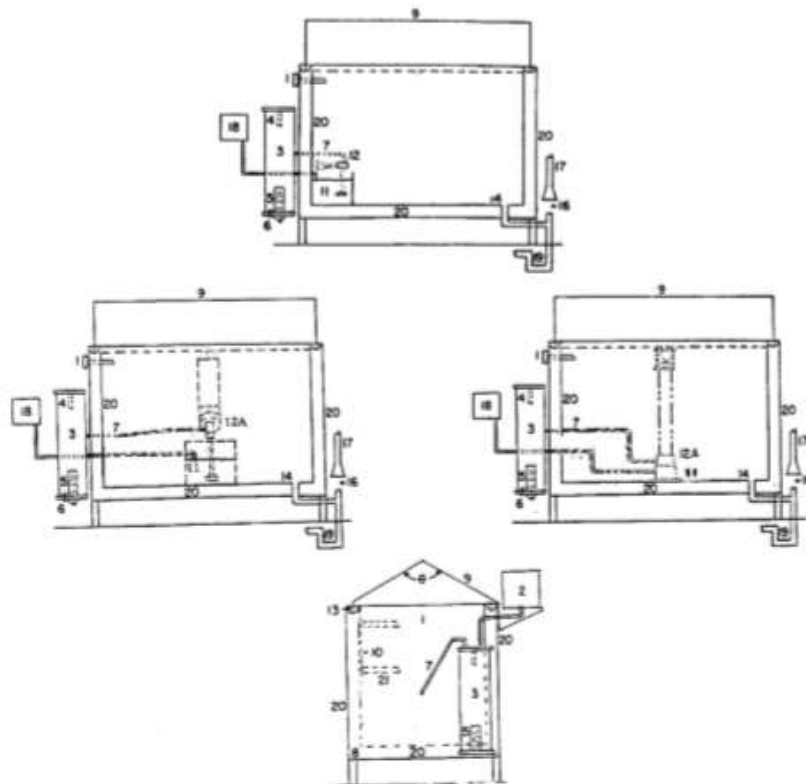
Siphon Height, cm	Air Flow, dm ³ /min				Solution Consumption, cm ³ /h			
	Air Pressure, kPa				Air Pressure, kPa			
	34	69	103	138	34	69	103	138
10	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
20	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
30	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
40	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904

Siphon Height, in.	Air Flow, L/min				Solution Consumption, mL/h			
	Air Pressure, psi				Air Pressure, psi			
	5	10	15	20	5	10	15	20
4	19	26.5	31.5	36	2100	3840	4584	5256
8	19	26.5	31.5	36	636	2760	3720	4320
12	19	26.5	31.5	36	0	1380	3000	3710
16	19	26.6	31.5	36	0	780	2124	2904

TABLE X1.2 Temperature and Pressure Requirements for Operation of Test at 95°F

	Air Pressure, kPa		
	Temperature, °C	83	96
	46	47	48
			49
	Air Pressure, psi		
	12	14	16
Temperature, °F	114	117	119
			121

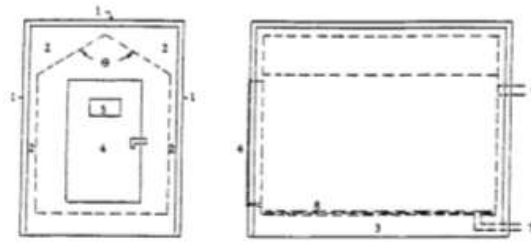
 B117 - 11



NOTE 1—This figure shows the various components including alternate arrangements of the spray nozzles and solution reservoir.

- 9—Angle of lid, 90 to 125°
- 1—Thermometer and thermostat for controlling heater (Item No. 8) in base
- 2—Automatic water leveling device
- 3—Humidifying tower
- 4—Automatic temperature regulator for controlling heater (Item No. 5)
- 5—Immersion heater, nonrusting
- 6—Air inlet, multiple openings
- 7—Air tube to spray nozzle
- 8—Heater in base
- 9—Hinged top, hydraulically operated, or counterbalanced
- 10—Brackets for rods supporting specimens, or test table
- 11—Internal reservoir
- 12—Spray nozzle above reservoir, suitably designed, located, and baffled
- 12A—Spray nozzle housed in dispersion tower located preferably in center of cabinet (typical examples)
- 13—Water seal
- 14—Combination drain and exhaust. Exhaust at opposite side of test space from spray nozzle (Item 12), but preferably in combination with drain, waste trap, and forced draft waste pipe (Items 16, 17, and 19)
- 15—number not used
- 16—Complete separation between forced draft waste pipe (Item 17) and combination drain and exhaust (Items 14 and 19) to avoid undesirable suction or back pressure
- 17—Forced draft waste pipe
- 18—Automatic leveling device for reservoir
- 19—Waste trap
- 20—Air space or water jacket
- 21—Test table or rack, well below roof area

FIG. X1.1 Typical Salt Spray Cabinet



NOTE 1—The controls are the same, in general as for the smaller laboratory type cabinet (Fig. X1.1), but are sized to care for the larger cube. The chamber has the following features:

- 6—Angle of ceiling, 90 to 125°
- 1—Heavy insulated outer panels
- 2—Air space
- 3—Low-watt density heaters, or steam coils
- 4—Single- or double-, full-opening door (refrigeration type), with inward sloping door sill
- 5—Viewing window/s
- 6—Inner chamber vent
- 7—Inner chamber drain
- 8—Duct boards on floor

FIG. X1.2 Walk-in Chamber, 1.5 by 2.4 m (5 by 8 ft) and Upward in Overall Size

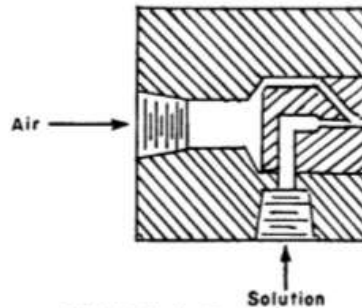


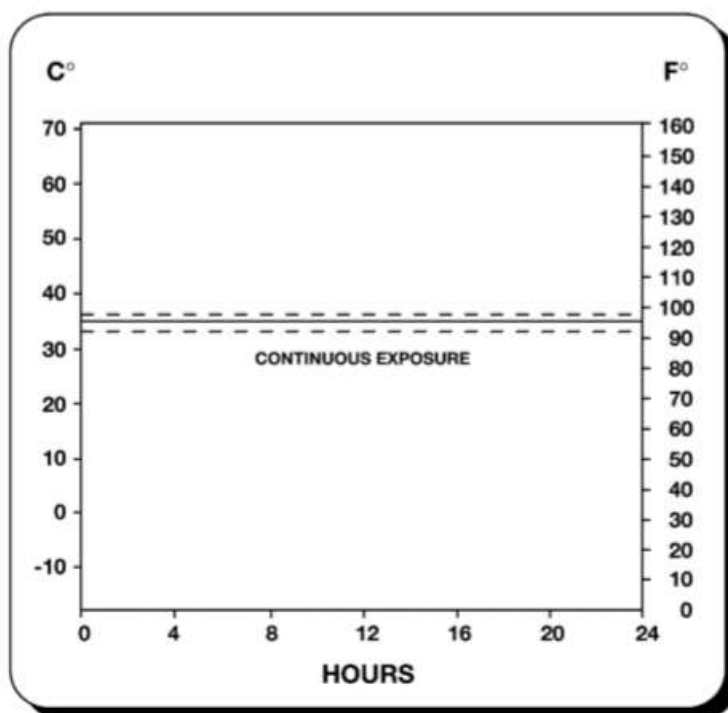
FIG. X1.3 Typical Spray Nozzle

X2. USE OF THE SALT SPRAY (FOG) TEST IN RESEARCH

X2.1 This practice is primarily used for process qualification and quality acceptance. Regarding any new applications, it is essential to correlate the results of this practice with actual field exposure results. (See Fig. X2.1.)

X2.2 The salt spray has been used to a considerable extent for the purpose of comparing different materials or finishes. It should be noted there is usually not a direct relation between salt spray (fog) resistance and resistance to corrosion in other media, because the chemistry of the reactions, including the formation of films and their protective value, frequently varies greatly with the precise conditions encountered. Informed personnel are aware of the erratic composition of basic alloys, the possibility of wide variations in quality and thickness of plated items produced on the same racks at the same time, and the consequent need for a mathematical determination of the

number of specimens required to constitute an adequate sample for test purposes. In this connection it is well to point out that Practice B117 is not applicable to the study or testing of decorative chromium plate (nickel-chromium) on steel or on zinc-base die castings or of cadmium plate on steel. For this purpose Test Method B368 and Practice G85 are available, which are also considered by some to be superior for comparison of chemically treated aluminum (chromated, phosphated, or anodized), although final conclusions regarding the validity of test results related to service experience have not been reached. Practice B117 and Practice G85 are considered to be most useful in estimating the relative behavior of closely related materials in marine atmospheres, since it simulates the basic conditions with some acceleration due to either wetness or temperature, or both.



NOTE 1—Dashed chart lines indicate temperature tolerance limits.

NOTE 2—Reprinted with permission.

- (1) Salt Solution— 5 ± 1 parts by mass of sodium chloride (NaCl) in 95 parts by mass of Specification D1193 Type IV water.
- (2) pH 6.5 to 7.2 of collected solution.
- (3) The exposure zone of the salt spray chamber shall be maintained at $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ($95 \pm 3^\circ\text{F}$). Each set point and its tolerance represents an operational control point for equilibrium conditions at a single location in the cabinet which may not necessarily represent the uniformity of conditions throughout the cabinet.
- (4) Fog at a rate of 1.0 to 2.0 mL/h per 80 cm² of horizontal collection area.

FIG. X2.1 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus

X3. EVALUATION OF CORROSIVE CONDITIONS

X3.1 General—This appendix covers test panels and procedures for evaluating the corrosive conditions within a salt spray cabinet. The procedure involves the exposure of steel test panels and the determination of their mass losses in a specified period of time. This may be done monthly or more frequently to ensure consistent operation over time. It is also useful for correlating the corrosive conditions among different cabinets.

X3.2 Test Panels—The required test panels, 76 by 127 by 0.8 mm (3.0 by 5.0 by .0315 in.), are made from SAE 1008 commercial-grade cold-rolled carbon steel (UNS G10080).

X3.3 Preparation of Panels Before Testing—Clean panels before testing by degreasing only, so that the surfaces are free of dirt, oil, or other foreign matter that could influence the test results. After cleaning, weigh each panel on an analytical balance to the nearest 1.0 mg and record the mass.

X3.4 Positioning of Test Panels—Place a minimum of two weighed panels in the cabinet, with the 127-mm (5.0 in.) length supported 30° from vertical. Place the panels in the proximity of the condensate collectors. (See Section 6.)

X3.5 Duration of Test—Expose panels to the salt fog for 48 to 168 h.

X3.6 Cleaning of Test Panels After Exposure—After removal of the panels from the cabinet, rinse each panel immediately with running tap water to remove salt, and rinse in reagent grade water (see Specification D1193, Type IV). Chemically clean each panel for 10 min at 20 to 25°C in a fresh solution prepared as follows:

Mix 1000 mL of hydrochloric acid (sp gr 1.19) with 1000 mL reagent grade water (D1193, Type IV) and add 10 g of hexamethylene tetramine. After cleaning, rinse each panel with reagent grade water (Type IV) and dry (see 13.2).

X3.7 *Determining Mass Loss*—Immediately after drying, determine the mass loss by reweighing and subtracting panel mass after exposure from its original mass.

X3.7.1 Data generated in the interlaboratory study using this method are available from ASTM as a Research Report.⁵

X3.8 Precision and Bias—Steel Panel Test

X3.8.1 An interlaboratory test program using three different sets of UNS G10080 steel panels, 76 by 127 by 0.8 mm (3.0 by 5.0 by .0315 in.) has shown that the repeatability of the mass loss of the steel panels, that is, the consistency in mass loss results that may be expected when replicate panels are run simultaneously in a salt spray cabinet, is dependent upon exposure time and the panel lot or source. The interlaboratory program yielded repeatability standard deviations, S_r , from which 95 % repeatability limits, r , were calculated as follows (see Practice E691):

$$r = 2.8 S_r \tag{X3.1}$$

X3.8.1.1 The values of S_r and r are reported in Table X3.1. Note that the corrosion rate of steel in this environment is approximately constant over the exposure interval and that the ratio of the standard deviation to the average mass loss, the coefficient of variation, C_v , varies between 5 and 10 % with a weighted average of 7.4 % and an r of ± 21 % of the average mass loss.

X3.8.2 This interlaboratory program also produced results on the reproducibility of results, that is, the consistency of mass loss results in tests in different laboratories or in different cabinets in the same facility. This program yielded reproducibility standard deviations, S_R , from which 95 % reproducibility limits, R , were calculated as follows (See Practice E691):

$$R = 2.8 S_R \tag{X3.2}$$

X3.8.2.1 The values of S_R and R are reported in Table X3.2. Note that the ratio of standard deviation to the average mass loss, the coefficient of variation, C_v , varies between 8 to 18 % with a weighted average of 12.7 % and an R of ± 36 % of the average mass loss.

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR-G01-1003.

X3.8.3 The mass loss of steel in this salt spray practice is dependent upon the area of steel exposed, the temperature, time of exposure, salt solution make up and purity, pH, spray conditions, and the metallurgy of the steel. The procedure in Appendix X3 for measuring the corrosivity of neutral salt spray cabinets with steel panels has no bias because the value of corrosivity of the salt spray is defined only in terms of this practice.

TABLE X3.1 Repeatability Statistics

NOTE 1—Based on two replicates in every test run. No. = number of different salt spray cabinets in test program; r = 95 % repeatability limits, g; C_v = S_r /avg. coefficient of variation, %; and S_r = repeatability standard deviations, g.

Materials	Test Duration, h	Average Mass Loss, g	S_r , g	C_v , %	r , g	No.
QP1	48	0.8170	0.0588	7.20	0.1646	12
QP1	96	1.5347	0.1048	7.28	0.2934	12
QP1	168	2.5996	0.2498	9.61	0.6994	12
AP	48	0.7787	0.0403	5.17	0.1128	10
AP	96	1.4094	0.0923	6.55	0.2584	10
AP	168	2.4309	0.1594	6.56	0.4463	10
QP2	48	0.8566	0.0686	8.01	0.1921	5
QP2	96	1.5720	0.0976	6.21	0.2733	5
QP2	168	2.7600	0.2588	9.38	0.7246	5

TABLE X3.2 Reproducibility Statistics

NOTE 1—No. = number of different salt spray cabinets in test program; R = 95 % reproducibility limits, g; C_v = S_R /avg. coefficient of variation, %; and S_R = reproducibility standard deviation, g.

Materials	Test Duration, h	Average Mass Loss, g	S_R , g	C_v , %	R , g	No.
QP1	48	0.8170	0.0947	11.58	0.2652	12
QP1	96	1.5347	0.2019	14.02	0.5653	12
QP1	168	2.5996	0.3255	12.52	0.9114	12
AP	48	0.7787	0.0805	10.33	0.2254	10
AP	96	1.4094	0.1626	11.54	0.4553	10
AP	168	2.4309	0.3402	14.00	0.9526	10
QP2	48	0.8566	0.1529	17.85	0.4281	5
QP2	96	1.5720	0.1319	8.39	0.3693	5
QP2	168	2.7600	0.3873	14.03	1.0844	5

SUMMARY OF CHANGES

Committee G01 has identified the location of selected changes to this standard since the last issue (B117-09) that may impact the use of this standard.

- (1) Added Note 10 and Note 12.
- (2) Added Table 3.
- (3) Added note to Table 1.

- (4) Revised 15.1.3, 15.1.4, and 15.1.5.
- (5) Revised 8.1 and 8.2.
- (6) Revised 10.2.



ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT/).



Designation: G1 – 03 (Reapproved 2011)

Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation G1; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers suggested procedures for preparing bare, solid metal specimens for tests, for removing corrosion products after the test has been completed, and for evaluating the corrosion damage that has occurred. Emphasis is placed on procedures related to the evaluation of corrosion by mass loss and pitting measurements. (**Warning**—In many cases the corrosion product on the reactive metals titanium and zirconium is a hard and tightly bonded oxide that defies removal by chemical or ordinary mechanical means. In many such cases, corrosion rates are established by mass gain rather than mass loss.)

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.* For specific warning statements, see 1.1 and 7.2.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

- A262 Practices for Detecting Susceptibility to Intergranular Attack in Austenitic Stainless Steels
- D1193 Specification for Reagent Water
- D1384 Test Method for Corrosion Test for Engine Coolants in Glassware

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee G01 on Corrosion of Metals and is the direct responsibility of Subcommittee G01.05 on Laboratory Corrosion Tests.

Current edition approved Dec. 1, 2011. Published April 2012. Originally approved in 1967. Last previous edition approved in 2003 as G1–2003. DOI: 10.1520/G0001-03R11.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

D2776 Methods of Test for Corrosivity of Water in the Absence of Heat Transfer (Electrical Methods) (Withdrawn 1991)³

G15 Terminology Relating to Corrosion and Corrosion Testing (Withdrawn 2010)³

G16 Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data

G31 Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals

G33 Practice for Recording Data from Atmospheric Corrosion Tests of Metallic-Coated Steel Specimens

G46 Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion

G50 Practice for Conducting Atmospheric Corrosion Tests on Metals

G78 Guide for Crevice Corrosion Testing of Iron-Base and Nickel-Base Stainless Alloys in Seawater and Other Chloride-Containing Aqueous Environments

3. Terminology

3.1 See Terminology G15 for terms used in this practice.

4. Significance and Use

4.1 The procedures given are designed to remove corrosion products without significant removal of base metal. This allows an accurate determination of the mass loss of the metal or alloy that occurred during exposure to the corrosive environment.

4.2 These procedures, in some cases, may apply to metal coatings. However, possible effects from the substrate must be considered.

5. Reagents and Materials

5.1 *Purity of Reagents*—Reagent grade chemicals shall be used in all tests. Unless otherwise indicated, it is intended that all reagents conform to the specifications of the Committee on Analytical Reagents of the American Chemical Society where

³ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

such specifications are available.⁴ Other grades may be used, provided it is first ascertained that the reagent is of sufficiently high purity to permit its use without lessening the accuracy of the determination.

5.2 *Purity of Water*—Unless otherwise indicated, references to water shall be understood to mean reagent water as defined by Type IV of Specification D1193.

6. Methods for Preparing Specimens for Test

6.1 For laboratory corrosion tests that simulate exposure to service environments, a commercial surface, closely resembling the one that would be used in service, will yield the most meaningful results.

6.2 It is desirable to mark specimens used in corrosion tests with a unique designation during preparation. Several techniques may be used depending on the type of specimen and test.

6.2.1 *Stencil or Stamp*—Most metallic specimens may be marked by stenciling, that is, imprinting the designation code into the metal surface using hardened steel stencil stamps hit with a hammer. The resulting imprint will be visible even after substantial corrosion has occurred. However, this procedure introduces localized strained regions and the possibility of superficial iron contamination in the marked area.

6.2.2 Electric engraving by means of a vibratory marking tool may be used when the extent of corrosion damage is known to be small. However, this approach to marking is much more susceptible to having the marks lost as a result of corrosion damage during testing.

6.2.3 Edge notching is especially applicable when extensive corrosion and accumulation of corrosion products is anticipated. Long term atmospheric tests and sea water immersion tests on steel alloys are examples where this approach is applicable. It is necessary to develop a code system when using edge notches.

6.2.4 Drilled holes may also be used to identify specimens when extensive metal loss, accumulation of corrosion products, or heavy scaling is anticipated. Drilled holes may be simpler and less costly than edge notching. A code system must be developed when using drilled holes. Punched holes should not be used as they introduce residual strain.

6.2.5 When it is undesirable to deform the surface of specimens after preparation procedures, for example, when testing coated surfaces, tags may be used for specimen identification. A metal or plastic wire can be used to attach the tag to the specimen and the specimen identification can be stamped on the tag. It is important to ensure that neither the tag nor the wire will corrode or degrade in the test environment. It is also important to be sure that there are no galvanic interactions between the tag, wire, and specimen.

6.3 For more searching tests of either the metal or the environment, standard surface finishes may be preferred. A suitable procedure might be:

6.3.1 Degrease in an organic solvent or hot alkaline cleaner. (See also Practice G31.)

Note 1—Hot alkalies and chlorinated solvents may attack some metals.
Note 2—Ultrasonic cleaning may be beneficial in both pre-test and post-test cleaning procedures.

6.3.2 Pickle in an appropriate solution if oxides or tarnish are present. In some cases the chemical cleaners described in Section 6 will suffice.

Note 3—Pickling may cause localized corrosion on some materials.
6.3.3 Abrade with a slurry of an appropriate abrasive or with an abrasive paper (see Practices A262 and Test Method D1384). The edges as well as the faces of the specimens should be abraded to remove burrs.

6.3.4 Rinse thoroughly, hot air dry, and store in desiccator.

6.4 When specimen preparation changes the metallurgical condition of the metal, other methods should be chosen or the metallurgical condition must be corrected by subsequent treatment. For example, shearing a specimen to size will cold work and may possibly fracture the edges. Edges should be machined.

6.5 The clean, dry specimens should be measured and weighed. Dimensions determined to the third significant figure and mass determined to the fifth significant figure are suggested. When more significant figures are available on the measuring instruments, they should be recorded.

7. Methods for Cleaning After Testing

7.1 Corrosion product removal procedures can be divided into three general categories: mechanical, chemical, and electrolytic.

7.1.1 An ideal procedure should remove only corrosion products and not result in removal of any base metal. To determine the mass loss of the base metal when removing corrosion products, replicate uncorroded control specimens should be cleaned by the same procedure being used on the test specimen. By weighing the control specimen before and after cleaning, the extent of metal loss resulting from cleaning can be utilized to correct the corrosion mass loss.

Note 4—It is desirable to scrape samples of corrosion products before using any chemical techniques to remove them. These scrapings can first be subjected to various forms of analyses, including perhaps X-ray diffraction to determine crystal forms as well as chemical analysis to look for specific corrosion products, such as chlorides. All of the chemical techniques that are discussed in Section 7 tend to destroy the corrosion products and thereby lose the information contained in these corrosion products. Care may be required so that uncorroded metal is not removed with the corrosion products.

7.1.2 The procedure given in 7.1.1 may not be reliable when heavily corroded specimens are to be cleaned. The application of replicate cleaning procedures to specimens with corroded surfaces will often, even in the absence of corrosion products, result in continuing mass losses. This is because a corroded surface, particularly of a multiphase alloy, is often more susceptible than a freshly machined or polished surface to

⁴ Reagent Chemicals: American Chemical Society Specifications, American Chemical Society, Washington, DC. For suggestions on the testing of reagents not listed by the American Chemical Society, see *Annual Standards for Laboratory Chemicals*, BDH Ltd., Poole, Dorset, U.K., and the United States Pharmacopeia and National Formulary, U.S. Pharmacopoeial Convention, Inc. (USPC), Rockville, MD.

corrosion by the cleaning procedure. In such cases, the following method of determining the mass loss due to the cleaning procedure is preferred.

7.1.2.1 The cleaning procedure should be repeated on specimens several times. The mass loss should be determined after each cleaning by weighing the specimen.

7.1.2.2 The mass loss should be graphed as a function of the number of equal cleaning cycles as shown in Fig. 1. Two lines will be obtained: AB and BC. The latter will correspond to corrosion of the metal after removal of corrosion products. The mass loss due to corrosion will correspond approximately to point B.

7.1.2.3 To minimize uncertainty associated with corrosion of the metal by the cleaning method, a method should be chosen to provide the lowest slope (near to horizontal) of line BC.

7.1.3 Repeated treatment may be required for complete removal of corrosion products. Removal can often be confirmed by examination with a low power microscope (for example, 7x to 30x). This is particularly useful with pitted surfaces when corrosion products may accumulate in pits. This repeated treatment may also be necessary because of the requirements of 7.1.2.1. Following the final treatment, the specimens should be thoroughly rinsed and immediately dried.

7.1.4 All cleaning solutions shall be prepared with water and reagent grade chemicals.

7.2 Chemical procedures involve immersion of the corrosion test specimen in a specific solution that is designed to remove the corrosion products with minimal dissolution of any base metal. Several procedures are listed in Table A1.1. The choice of chemical procedure to be used is partly a matter of trial and error to establish the most effective method for a specific metal and type of corrosion product scale. (Warning—These methods may be hazardous to personnel).

7.2.1 Chemical cleaning is often preceded by light brushing (not metallic bristle) or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products.

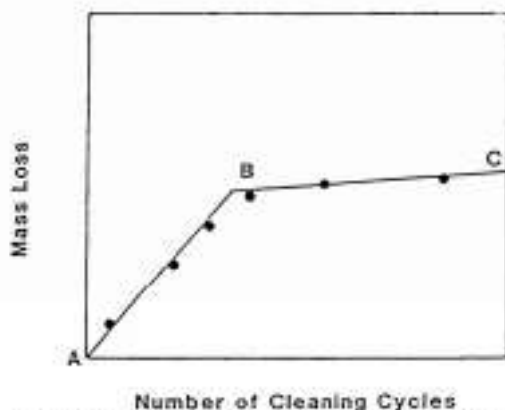


FIG. 1 Mass Loss of Corroded Specimens Resulting from Repetitive Cleaning Cycles

7.2.2 Intermittent removal of specimens from the cleaning solution for light brushing or ultrasonic cleaning can often facilitate the removal of tightly adherent corrosion products.

7.2.3 Chemical cleaning is often followed by light brushing or ultrasonic cleaning in reagent water to remove loose products.

7.3 Electrolytic cleaning can also be utilized for removal of corrosion products. Several useful methods for corrosion test specimens of iron, cast iron, or steel are given in Table A2.1.

7.3.1 Electrolytic cleaning should be preceded by brushing or ultrasonic cleaning of the test specimen to remove loose, bulky corrosion products. Brushing or ultrasonic cleaning should also follow the electrolytic cleaning to remove any loose slime or deposits. This will help to minimize any redeposition of metal from reducible corrosion products that would reduce the apparent mass loss.

7.4 Mechanical procedures can include scraping, scrubbing, brushing, ultrasonic cleaning, mechanical shocking, and impact blasting (for example, grit blasting, water-jet blasting, and so forth). These methods are often utilized to remove heavily encrusted corrosion products. Scrubbing with a nonmetallic bristle brush and a mild abrasive-distilled water slurry can also be used to remove corrosion products.

7.4.1 Vigorous mechanical cleaning may result in the removal of some base metal; therefore, care should be exercised. These should be used only when other methods fail to provide adequate removal of corrosion products. As with other methods, correction for metal loss due to the cleaning method is recommended. The mechanical forces used in cleaning should be held as nearly constant as possible.

8. Assessment of Corrosion Damage

8.1 The initial total surface area of the specimen (making corrections for the areas associated with mounting holes) and the mass lost during the test are determined. The average corrosion rate may then be obtained as follows:

$$\text{Corrosion Rate} = (K \times W) / (A \times T \times D) \quad (1)$$

where:

K = a constant (see 8.1.2),

T = time of exposure in hours,

A = area in cm^2 ,

W = mass loss in grams, and

D = density in g/cm^3 (see Appendix X1).

8.1.1 Corrosion rates are not necessarily constant with time of exposure. See Practice G31 for further guidance.

8.1.2 Many different units are used to express corrosion rates. Using the units in 7.1 for T , A , W , and D , the corrosion rate can be calculated in a variety of units with the following appropriate value of K :

Corrosion Rate Units Desired	Constant (K) in Corrosion Rate Equation
mils per year (mpy)	3.45×10^4
inches per year (ipy)	3.45×10^3
inches per month (ipm)	2.87×10^2
millimetres per year (mm/y)	8.76×10^4
micrometres per year ($\mu\text{m}/\text{y}$)	8.76×10^2
micrometres per second ($\mu\text{m}/\text{s}$)	2.70×10^2
grams per square meter per hour ($\text{g}/\text{m}^2/\text{h}$)	$1.00 \times 10^4 \times D$
milligrams per square decimeter per day (mdd)	$2.40 \times 10^4 \times D$

micrograms per square meter per second ($\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{s}$) $2.78 \times 10^7 \times D$

Note 1—If desired, these constants may also be used to convert corrosion rates from one set of units to another. To convert a corrosion rate in units X to a rate in units Y, multiply by K_x/K_y ; for example:

$$15 \text{ mpy} = 15 \times (2.78 \times 10^7) / (3.45 \times 10^6) \text{ mm/a} \quad (2)$$

8.1.3 In the case of sacrificial alloy coatings for which there is preferential corrosion of a component whose density differs from that of the alloy, it is preferable to use the density of the corroded component (instead of the initial alloy density) for calculating average thickness loss rate by use of Eq 1. This is done as follows: (1) cleaning to remove corrosion products only and determine the mass loss of the corroded component; (2) stripping the remaining coating to determine the mass of the uncorroded component; (3) chemical analysis of the stripping solution to determine the composition of the uncorroded component; (4) performing a mass balance to calculate the composition of the corroded component; (5) using the mass and density of the corroded component to calculate the average thickness loss rate by use of Eq 1. An example of this procedure is given in Appendix X2.

The procedure described above gives an average penetration rate of the coating, but the maximum penetration for a multiphase alloy may be larger when the corroded phase is not uniformly distributed across the surface. In such cases, it is generally considered good practice to obtain a cross section through the corroded surface for microscopic examination. This examination will reveal the extent of selective corrosion of particular phases in the coating, and help in understanding the mechanism of attack.

8.2 Corrosion rates calculated from mass losses can be misleading when deterioration is highly localized, as in pitting or crevice corrosion. If corrosion is in the form of pitting, it may be measured with a depth gage or micrometer calipers with pointed anvils (see Guide G46). Microscopical methods will determine pit depth by focusing from top to bottom of the pit when it is viewed from above (using a calibrated focusing knob) or by examining a section that has been mounted and metallographically polished. The pitting factor is the ratio of the deepest metal penetration to the average metal penetration (as measured by mass loss).

Note 6—See Guide G46 for guidance in evaluating depth of pitting.

Note 7—See Guide G78 for guidance in evaluating crevice corrosion.

8.3 Other methods of assessing corrosion damage are:

8.3.1 *Appearance*—The degradation of appearance by rusting, tarnishing, or oxidation. (See Practice G33.)

8.3.2 *Mechanical Properties*—An apparent loss in tensile strength will result if the cross-sectional area of the specimen (measured before exposure to the corrosive environment) is reduced by corrosion. (See Practice G50.) Loss in tensile strength will result if a compositional change, such as dealloying, takes place. Loss in tensile strength and elongation will result from localized attack, such as cracking or intergranular corrosion.

8.3.3 *Electrical Properties*—Loss in electrical conductivity can be measured when metal loss results from uniform corrosion. (See Test Methods D2776.)

8.3.4 *Microscopical Examination*—Dealloying, exfoliation, cracking, or intergranular attack may be detected by metallographic examination of suitably prepared sections.

9. Report

9.1 The report should include the compositions and sizes of specimens, their metallurgical conditions, surface preparations, and cleaning methods as well as measures of corrosion damage, such as corrosion rates (calculated from mass losses), maximum depths of pitting, or losses in mechanical properties.

10. Precision and Bias

10.1 The factors that can produce errors in mass loss measurement include improper balance calibration and standardization. Generally, modern analytical balances can determine mass values to ± 0.2 mg with ease and balances are available that can obtain mass values to ± 0.02 mg. In general, mass measurements are not the limiting factor. However, inadequate corrosion product removal or overcleaning will affect precision.

10.2 The determination of specimen area is usually the least precise step in corrosion rate determinations. The precision of calipers and other length measuring devices can vary widely. However, it generally is not necessary to achieve better than $\pm 1\%$ for area measurements for corrosion rate purposes.

10.3 The exposure time can usually be controlled to better than $\pm 1\%$ in most laboratory procedures. However, in field exposures, corrosive conditions can vary significantly and the estimation of how long corrosive conditions existed can present significant opportunities for error. Furthermore, corrosion processes are not necessarily linear with time, so that rate values may not be predictive of the future deterioration, but only are indications of the past exposure.

10.4 Regression analysis on results, as are shown in Fig. 1, can be used to obtain specific information on precision. See Guide G16 for more information on statistical analysis.

10.5 Bias can result from inadequate corrosion product removal or metal removal caused by overcleaning. The use of repetitive cleaning steps, as shown in Fig. 1, can minimize both of these errors.

10.5.1 Corrosion penetration estimations based on mass loss can seriously underestimate the corrosion penetration caused by localized processes, such as pitting, cracking, crevice corrosion, and so forth.

11. Keywords

11.1 cleaning; corrosion product removal; evaluation; mass loss; metals; preparation; specimens

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. CHEMICAL CLEANING PROCEDURES

TABLE A1.1 Chemical Cleaning Procedures for Removal of Corrosion Products

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
C.1.1	Aluminum and Aluminum Alloys	50 mL phosphoric acid (H ₃ PO ₄ , sp gr 1.69) 20 g chromium trioxide (CrO ₃) Reagent water to make 1000 mL.	5 to 10 min	60°C to Boiling	If corrosion product films remain, next, then follow with nitric acid procedure (C.1.2).
C.1.2		Nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42)	1 to 5 min	20 to 25°C	Removes oxides deposits and bulky corrosion products to avoid reactions that may result in excessive removal of base metal.
C.2.1	Copper and Copper Alloys	500 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.18) Reagent water to make 1000 mL.	1 to 3 min	20 to 25°C	Oxidation of solution with purified nitrogen will minimize base metal removal.
C.2.2		4.0 g sodium cyanide (NaCN) Reagent water to make 1000 mL.	1 to 3 min	20 to 25°C	Removes copper sulfide corrosion products that may not be removed by hydrochloric acid treatment (C.2.1).
C.2.3		100 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL.	1 to 3 min	20 to 25°C	Removes bulky corrosion products before treatment to minimize copper redeposition on specimen surface.
C.2.4		120 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) 20 g sodium dichromate (Na ₂ C ₂ O ₇ ·2H ₂ O) Reagent water to make 1000 mL.	5 to 10 s	20 to 25°C	Removes redeposited copper resulting from sulfuric acid treatment.
C.2.5		54 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL.	30 to 60 min	40 to 50°C	Decompose solution with nitrogen. Brushing of test specimens to remove corrosion products followed by re-immersion for 3 to 4 s is recommended.
C.3.1	Iron and Steel	1000 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.18) 25 g antimony trioxide (Sb ₂ O ₃) 50 g stannous chloride (SnCl ₂) 50 g sodium hydroxide (NaOH) 200 g granulated zinc or zinc dust Reagent water to make 1000 mL.	1 to 25 min	20 to 25°C	Solution should be vigorously stirred or specimen should be brushed. Longer times may be required in certain instances.
C.3.2		200 g sodium hydroxide (NaOH) 25 g granulated zinc or zinc dust Reagent water to make 1000 mL.	30 to 40 min	60 to 90°C	Caution should be exercised in the use of any zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.3.3		200 g sodium hydroxide (NaOH) 25 g granulated zinc or zinc dust Reagent water to make 1000 mL.	30 to 40 min	60 to 90°C	Caution should be exercised in the use of any zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.3.4		150 g ammonium chloride (NH ₄ Cl·H ₂ O) Reagent water to make 1000 mL.	30 min	75 to 90°C	Depending upon the composition of the corrosion product, attack of base metal may occur.
C.3.5		500 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.18) 5.0 g hexamethylenetetramine Reagent water to make 1000 mL.	10 min	20 to 25°C	Longer times may be required in certain instances.
C.3.6		Molten caustic soda (NaOH) with 1.5-2.0 % sodium hydride (NaH)	1 to 20 min	370°C	For details refer to Technical Information Bulletin SP29-370, "DuPont Sodium Hydride Descaling Process Operating Instructions."
C.4.1	Lead and Lead Alloys	10 mL acetic acid (CH ₃ COOH) Reagent water to make 1000 mL.	5 min	Boiling	—
C.4.2		50 g ammonium acetate (CH ₃ COONH ₄) Reagent water to make 1000 mL.	10 min	60 to 70°C	—
C.4.3		250 g ammonium acetate (CH ₃ COONH ₄) Reagent water to make 1000 mL.	5 min	60 to 70°C	—
C.5.1	Magnesium and Magnesium Alloys	150 g chromium trioxide (CrO ₃) 10 g silver chromate (Ag ₂ CrO ₄) Reagent water to make 1000 mL.	1 min	Boiling	The silver salt is present to precipitate chloride.
C.5.2		200 g chromium trioxide (CrO ₃) 10 g silver nitrate (AgNO ₃) 20 g barium nitrate (Ba(NO ₃) ₂) Reagent water to make 1000 mL.	1 min	20 to 25°C	The barium salt is present to precipitate sulfate.
C.6.1	Nickel and Nickel Alloys	150 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.18) Reagent water to make 1000 mL.	1 to 3 min	20 to 25°C	—
C.6.2		100 mL sulfuric acid (H ₂ SO ₄ , sp gr 1.84) Reagent water to make 1000 mL.	1 to 3 min	20 to 25°C	—
C.7.1	Stainless Steels	100 mL nitric acid (HNO ₃ , sp gr 1.42) Reagent water to make 1000 mL.	20 min	60°C	—
C.7.2		150 g ammonium chloride (NH ₄ Cl·H ₂ O) Reagent water to make 1000 mL.	10 to 60 min	70°C	—

TABLE A1.1 Continued

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
C.7.3		100 g sulfuric acid (H_2SO_4) 20 mL sulfuric acid (H_2SO_4 , sp gr 1.84) 2 g inhibitor (diethylenetriamine or quinoline ethylidide or tetrasophtol quinoline)	5 min	60°C	-
C.7.4		Reagent water to make 1000 mL 200 g sodium hydroxide (NaOH) 50 g potassium permanganate ($KMnO_4$) Reagent water to make 1000 mL, followed by 100 g diammonium citrate ($(NH_4)_2HC_6H_4O_7$)	5 min	Boiling	-
C.7.5		Reagent water to make 1000 mL 100 mL nitric acid (HNO_3 , sp gr 1.42) 20 mL hydrofluoric acid (HF, sp gr 1.186-48 %)	5 to 20 min	20 to 25°C	-
C.7.6		Reagent water to make 1000 mL 200 g sodium hydroxide (NaOH) 50 g zinc powder	35 min	Boiling	Caution should be exercised in the use of dry zinc dust since spontaneous ignition upon exposure to air can occur.
C.8.1	Tin and Tin Alloys	Reagent water to make 1000 mL 150 g trisodium phosphate ($Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$)	10 min	Boiling	-
C.8.2		Reagent water to make 1000 mL 20 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.18)	10 min	20°C	-
C.8.3	Zinc and Zinc Alloys	150 mL ammonium hydroxide (NH_4OH , sp gr 0.88) Reagent water to make 1000 mL, followed by 50 g chromium trioxide (CrO_3) 10 g silver nitrate ($AgNO_3$) Reagent water to make 1000 mL	5 min 15 to 20 s	20 to 25°C Boiling	The silver nitrate should be dissolved in water and added to the boiling chromic acid to prevent excessive crystallization of silver chromate. The chromic acid must be sulfate free to avoid attack of the zinc base metal.
C.8.4		100 g ammonium chloride (NH_4Cl) Reagent water to make 1000 mL	2 to 5 min	70°C	-
C.8.5		200 g chromium trioxide (CrO_3) Reagent water to make 1000 mL	1 min	80°C	Chromate contamination of the chromic acid from corrosion products formed in salt environments should be avoided to prevent attack of the zinc base metal.
C.8.6		50 mL hydrochloric acid (HCl, sp gr 1.25) Reagent water to make 1000 mL	15 s	20 to 25°C	Some zinc base metal may be removed. A control specimen (3.1.1) should be employed.
C.8.7		100 g ammonium persulfate ($(NH_4)_2S_2O_8$) Reagent water to make 1000 mL	5 min	20 to 25°C	Particularly recommended for galvanized steel.
C.8.8		100 g ammonium acetate (CH_3COONH_4) Reagent water to make 1000 mL	2 to 5 min	70°C	-

A2. ELECTROLYTIC CLEANING PROCEDURES

TABLE A2.1 Electrolytic Cleaning Procedures for Removal of Corrosion Products

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
E.1.1	Iron, Cast Iron, Steel	75 g sodium hydroxide (NaOH) 25 g sodium sulfate (Na_2SO_4) 75 g sodium carbonate (Na_2CO_3) Reagent water to make 1000 mL	20 to 40 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 to 200 A/m ² current density. Use carbon, platinum or stainless steel anode.
E.1.2		28 mL sulfuric acid (H_2SO_4 , sp gr 1.84) 5 g inhibitor (diethylenetriamine or quinoline ethylidide or tetrasophtol quinoline)	3 min	70°C	Cathodic treatment with 2000 A/m ² current density. Use carbon, platinum or steel anode.
E.1.3		Reagent water to make 1000 mL 100 g diammonium citrate ($(NH_4)_2HC_6H_4O_7$) Reagent water to make 1000 mL	5 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/m ² current density. Use carbon or platinum anode.

TABLE A2.1 Continued

Designation	Material	Solution	Time	Temperature	Remarks
E.2.1	Lead and Lead Alloys	28 mL sulfuric acid (H_2SO_4 , to gr 1.84) 0.5 g inhibitor (pluriboly) thionea or quinoline ethylamide or tetrasophol (quinone)	2 min	70°C	Cathodic treatment with 2000 A/in ² current density. Use carbon, platinum or lead anode.
E.3.1	Copper and Copper Alloys	Reagent water to make 1000 mL 7.5 g potassium chloride (KCl)	1 to 2	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/in ² current density. Use carbon or platinum anode.
E.4.1	Zinc and Cadmium	Reagent water to make 1000 mL 50 g dibasic sodium phosphate (Na_2HPO_4)	5 min	70°C	Cathodic treatment with 110 A/in ² current density. Specimen must be energized prior to immersion. Use carbon, platinum or stainless steel anode.
E.4.2		100 g sodium hydroxide (NaOH) Reagent water to make 1000 mL	1 to 2 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 100 A/in ² current density. Specimen must be energized prior to immersion. Use carbon, platinum or stainless steel anode.
E.5.1	General (excluding Aluminum, Magnesium and Ti Alloys)	20 g sodium hydroxide (NaOH) Reagent water to make 1000 mL	5 to 10 min	20 to 25°C	Cathodic treatment with 300 A/in ² current density. A S21600 stainless steel anode may be used.

APPENDIXES

(Nonmandatory Information)

X1. DENSITIES FOR A VARIETY OF METALS AND ALLOYS

TABLE X1.1 Densities for a Variety of Metals and Alloys

Note 1—All UNS numbers that include the letter X indicate a series of numbers under one category.

Note 2—An asterisk indicates that a UNS number not available.

UNS Number	Aluminum Alloys	
	Aloy	Density g/cm ³
A01100	1100	2.71
A01190	1198	2.70
A02004	2024	2.78
A02219	2019	2.84
A03003	3003	2.73
A03004	3004	2.72
A03205	3005	2.70
A03250	3050	2.69
A03503	3053	2.69
A03503	5053	2.85
A03508	5080	2.85
A03508	5080	2.85
A03154	5154	2.80
A03337	5357	2.89
A03454	5454	2.89
A03456	5456	2.86
A03691	6061	2.70
*	6062	2.70
A03693	6070	2.71
A03131	6101	2.70
A07075	7075	2.81
A07079	7079	2.75
A07178	7178	2.83
	Stainless Steels	
S20100	Type 201	7.94
S20200	Type 202	7.94
S20300	Type 300	7.94
S20400	Type 304	7.94
S20403	Type 304L	7.94
S20900	Type 309	7.93
S21000	Type 310	7.99
S21100	Type 311	7.98
S21600	Type 316	7.93
S21603	Type 316L	7.93
S21700	Type 317	7.98
S32100	Type 321	7.94
S32900	Type 329	7.98
N20030	Type 350	7.93

TABLE X1.1 Continued

Aluminum Alloys		
UNS Number	Alloy	Density (g/cm ³)
S24700	Type 247	8.03
S41000	Type 410	7.70
S43000	Type 430	7.72
S44800	Type 445	7.85
S52000	Type 520	7.82
Other Ferrous Metals		
F10000	Gray cast iron	7.20
G00000-K00000	Carbon steel	7.80
*	Silicon iron	7.00
K00000	Low alloy steels	7.85
Copper Alloys		
C09600	Copper	8.96
C20600	Red brass 230	8.75
C28000	Cartridge brass 260	8.52
C26600	Muntz metal 260	8.39
*	Admiralty 402	8.52
C44300	Admiralty 403	8.52
C46400	Admiralty 404	8.52
C46500	Admiralty 405	8.52
C08700	Aluminum brass 607	8.33
C20300	Commercial bronze 220	8.80
C06000	Aluminum bronze, 5% Al	8.16
*	Aluminum bronze, 8% Al	7.78
*	Composition M	8.45
*	Composition G	8.77
C81000	Phosphor bronze, 5% Sn	8.88
C52400	Phosphor bronze, 10% Sn	8.77
*	95-5-G-1	8.80
C66500	Silicon bronze 630	8.52
C70600	Copper nickel 705	8.94
C71000	Copper nickel 710	8.94
C71600	Copper nickel 715	8.94
C75200	Nickel silver 752	8.75
Lead		
L53000-53400	Antimonial	10.80
L33000	Chemical	11.33
Nickel Alloys		
N02200	Nickel 200	8.80
N04400	Nickel copper 400	8.84
N02000	Nickel chromium iron alloy 600	8.01
N06020	Nickel chromium molybdenum alloy 625	8.44
N06025	Iron nickel chromium alloy 625	8.14
N06020	Iron nickel chromium alloy 20 Cb-3	8.08
*	Iron nickel chromium cast alloy 20	8.02
N10660	Nickel molybdenum alloy 80	8.2
N10270	Nickel chromium molybdenum alloy C-270	8.5
N06980	Nickel chromium molybdenum alloy G-3	8.3
Other Metals		
M10000	Magnesium	1.74
R02000	Molybdenum	10.22
P04990	Palladium	21.45
P07710	Silver	10.49
R02000	Tantalum	18.60
L13000	Ti	4.50
R02000	Titanium	4.54
Z13001	Zinc	7.13
R60001	Zirconium	6.52

X2. CALCULATION OF AVERAGE THICKNESS LOSS RATE OF AN ALLOY WHEN THE DENSITY OF THE CORRODING METAL DIFFERS FROM THAT OF THE BULK ALLOY

X2.1 Example

X2.1.1 55% Al-Zn alloy coating on steel sheet exposed for 20.95 years at Point Reyes, CA. (As reported in H.E. Townsend and H.H. Lawson, "Twenty-One Year Results for Metallic-Coated Sheet in the ASTM 1976 Atmospheric Corrosion Test").¹

X2.2 Measurements

X2.2.1 Initial aluminum content of coating, C_1 , as measured by stripping (Table A1.1, C.3.) and chemical analysis of uncorroded specimens.

$$C_1 = 55.0\% \text{ Al} \quad (\text{X2.1})$$

X2.2.2 Time of Exposure, T

$$T = 20.95 \text{ years} = 183\,648 \text{ hours} \quad (\text{X2.2})$$

X2.2.3 Specimen Area, A

$$A = 300 \text{ cm}^2 \quad (\text{X2.3})$$

X2.2.4 Initial Mass, W_1

$$W_1 = 79.3586 \text{ g} \quad (\text{X2.4})$$

X2.2.5 Mass after exposure and removal of corrosion products according to Table A1.1, C.9.3, W_2

$$W_2 = 78.7660 \text{ g} \quad (\text{X2.5})$$

X2.2.6 Mass after removal of remaining coating according to Table A1.1, C.3.5, W_3

$$W_3 = 75.0810 \text{ g} \quad (\text{X2.6})$$

X2.2.7 Aluminum content of remaining uncorroded coating by chemical analysis of the stripping solution, C_2

$$C_2 = 57.7\% \text{ Al} \quad (\text{X2.7})$$

X2.3 Calculations

X2.3.1 Mass loss of corroded coating, W

$$W = W_1 - W_2 = 79.3586 - 78.7660 = 0.5926 \text{ g} \quad (\text{X2.8})$$

X2.3.2 Mass of remaining uncorroded coating, W_3

$$W_3 = W_2 - W_3 = 78.7660 - 75.0810 = 3.6850 \text{ g} \quad (\text{X2.9})$$

X2.3.3 Total mass of original coating, W_4

$$W_4 = W + W_3 = 0.5926 + 3.6850 = 4.2776 \text{ g} \quad (\text{X2.10})$$

X2.3.4 Composition of corroded coating, C

$$CW + C_2W_3 = C_1W_4 \quad (\text{X2.11})$$

Rearranging gives

$$C = (C_1W_4 - C_2W_3)/W \quad (\text{X2.12})$$

$$C = (55.0 \times 4.2776 - 57.7 \times 3.6850)/0.5926 \quad (\text{X2.13})$$

$$C = 38.2\% \text{ Al} \quad (\text{X2.14})$$

X2.3.5 The density, D, of a 38.2 % Al-Zn alloy is 4.32 g/cm³. In cases where alloy densities are not known, they can be estimated by linear interpolation of the component densities.

X2.3.6 Calculate the average thickness loss rate, L (corrosion rate per Eq 1).

$$L = (K \times W)/(A \times T \times D) \quad (\text{X2.15})$$

where:

$$L = (8.76 \times 10^7 \times 0.5926)/(300 \times 183\,648 \times 4.32)$$

$$L = 0.218 \text{ micrometres per year}$$

¹ NIP 1421, Outdoor Atmospheric Corrosion, Townsend, H. E., Ed., ASTM International, West Conshohocken, PA, 2002, pp. 204-201.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards, and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2999, United States. Individual reports (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9885 (phone), 610-832-9853 (fax), or service@astm.org (e-mail), or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the ASTM website (www.astm.org/COPYRIGHT).

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS

2000

SECTION THREE

**Metals Test Methods and
Analytical Procedures**



VOLUME 03.03

Nondestructive Testing



ASTM E165-95

Revision issued annually



Standard Test Method for Liquid Penetrant Examination¹

This standard is issued under the fixed designation E 165; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscripted epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

1. Scope

1.1 This test method² covers procedures for penetrant examination of materials. They are nondestructive testing methods for detecting discontinuities that are open to the surface such as cracks, seams, laps, cold shuts, laminations, through leaks, or lack of fusion and are applicable to in-process, final, and maintenance examination. They can be effectively used in the examination of nonporous, metallic materials, both ferrous and nonferrous, and of nonmetallic materials such as glazed or fully densified ceramics, certain nonporous plastics, and glass.

1.2 This test method also provides a reference:

1.2.1 By which a liquid penetrant examination process recommended or required by individual organizations can be reviewed to ascertain its applicability and completeness.

1.2.2 For use in the preparation of process specifications dealing with the liquid penetrant examination of materials and parts. Agreement by the user and the supplier regarding specific techniques is strongly recommended.

1.2.3 For use in the organization of the facilities and personnel concerned with the liquid penetrant examination.

1.3 This test method does not indicate or suggest criteria for evaluation of the indications obtained. It should be pointed out, however, that after indications have been produced, they must be interpreted or classified and then evaluated. For this purpose there must be a separate code or specification or a specific agreement to define the type, size, location, and direction of indications considered acceptable, and those considered unacceptable.

1.4 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. SI units are provided for information only.

1.5 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. For specific hazard statements, see Note 5, Note 12, and Note 20.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

D 129 Test Method for Sulfur in Petroleum Products (General Bomb Method)³

D 516 Test Method for Sulfate Ion in Water⁴

D 808 Test Method for Chlorine in New and Used Petroleum Products (Bomb Method)⁵

D 1193 Specification for Reagent Water⁴

D 1552 Test Method for Sulfur in Petroleum Products (High-Temperature Method)³

D 4327 Test Method for Anions in Water by Chemically Suppressed Ion Chromatography⁴

E 433 Reference Photographs for Liquid Penetrant Inspection⁵

E 543 Practice for Evaluating Agencies that Perform Nondestructive Testing⁵

E 1208 Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Lipophilic Post-Emulsification Process⁵

E 1209 Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Water-Washable Process⁵

E 1210 Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Hydrophilic Post-Emulsification Process⁵

E 1219 Test Method for Fluorescent Liquid Penetrant Examination Using the Solvent-Removable Process⁵

E 1220 Test Method for Visible Penetrant Examination Using the Solvent-Removable Process⁵

E 1316 Terminology for Nondestructive Examinations⁵

E 1418 Test Method for Visible Penetrant Examination Using the Water-Washable Process⁵

2.2 ASNT Document:

Recommended Practice SNT-TC-1A for Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification⁶

2.3 Military Standard:

MIL-STD-410 Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification⁷

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E-7 on Nondestructive Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E07.01 on Liquid Penetrant and Magnetic Particle Methods.

Current edition approved Jan. 15, 1995. Published March 1995. Originally published as E 165 - 80 T. Last previous edition E 165 - 94.

² For ASME Boiler and Pressure Vessel Code applications see related Recommended Test Method SE-165 in the Code.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 05.01.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 11.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.03.

⁶ Available from the American Society for Nondestructive Testing, 1711 Arling Lane, Columbus, OH 43228-0518.

⁷ Available from Standardization Documents Order Desk, Bldg. 4 Section D, 700 Robbins Ave., Philadelphia, PA 19111-5094, Attn: NPODIS.

2.4 APHA Standard
429 Method for the Examination of Water and Wastewater³

3. Terminology

3.1 The definitions relating to liquid penetrant examination, which appear in Terminology E 1316, shall apply to the terms used in this standard.

4. Summary of Test Method

4.1 A liquid penetrant which may be a visible or a fluorescent material is applied evenly over the surface being examined and allowed to enter open discontinuities. After a suitable dwell time, the excess surface penetrant is removed. A developer is applied to draw the entrapped penetrant out of the discontinuity and stain the developer. The test surface is then examined to determine the presence or absence of indications.

Note 1—The developer may be omitted by agreement between purchaser and supplier.

Note 2—**Caution:** Fluorescent penetrant examination shall not follow a visible penetrant examination unless the procedure has been qualified in accordance with 10.2, because visible dyes may cause deterioration or quenching of fluorescent dyes.

4.2 Processing parameters, such as surface precleaning, penetration time and excess penetrant removal methods, are determined by the specific materials used, the nature of the part under examination, (that is, size, shape, surface condition, alloy) and type of discontinuities expected.

5. Significance and Use

5.1 Liquid penetrant examination methods indicate the presence, location and, to a limited extent, the nature and magnitude of the detected discontinuities. Each of the various methods has been designed for specific uses such as critical service items, volume of parts, portability or localized areas of examination. The method selected will depend accordingly on the service requirements.

6. Classification of Penetrations and Methods

6.1 Liquid penetrant examination methods and types are classified as shown in Table 1.

6.2 *Fluorescent penetrant examination* utilizes penetrants that fluoresce brilliantly when excited by black light (see 8.9.1.2). The sensitivity of fluorescent penetrants depends on their ability to be retained in the various size discontinuities during processing, then to bleed out into the developer coating and produce indications that will fluoresce. Fluorescent indications are many times brighter than their surroundings when viewed under black light illumination.

6.3 *Visible penetrant examination* uses a penetrant that can be seen in visible light. The penetrant is usually red, so that the indications produce a definite contrast with the white background of the developer. The visible penetrant process does not require the use of black light. However, visible penetrant indications must be viewed under adequate white light (see 8.9.2.1).

³ Available from American Public Health Association, Publication Office, 3013 Fifteenth Street, NW, Washington, DC 20005

TABLE 1 Classification of Penetrant Examination Types and Methods

Type I—Fluorescent Penetrant Examination
Method A—Water-washable (see Test Method E 1208)
Method B—Post-emulsifiable, lipophilic (see Test Method E 1208)
Method C—Solvent removable (see Test Method E 1210)
Method D—Post-emulsifiable, hydrophilic (see Test Method E 1210)
Type II—Visible Penetrant Examination
Method A—Water-washable (see Test Method E 1418)
Method C—Solvent removable (see Test Method E 1220)

7. Types of Materials

7.1 *Liquid penetrant examination materials* (see Notes 3-5) consist of fluorescent and visible penetrants, emulsifiers (oil-base and water-base; fast and slow acting), solvent removers and developers. A family of liquid penetrant examination materials consists of the applicable penetrant and emulsifier or remover, as recommended by the manufacturer. Intermixing of materials from various manufacturers is not recommended.

Note 3—Refer to 9.1 for special requirements for sulfur, halogen and alkali metal content.

Note 4—**Caution:** While approved penetrant materials will not adversely affect common metallic materials, some plastics or rubbers may be swollen or stained by certain penetrants.

Note 5—**Warning:** These materials may be flammable or emit hazardous and toxic vapors. Observe all manufacturer's instructions and precautionary statements.

7.2 Penetrants

7.2.1 *Post-Emulsifiable Penetrants* are designed to be insoluble in water and cannot be removed with water rinsing alone. They are designed to be selectively removed from the surface using a separate emulsifier. The emulsifier, properly applied and given a proper emulsification time, combines with the excess surface penetrant to form a water-washable mixture, which can be rinsed from the surface, leaving the surface free of fluorescent background. Proper emulsification time must be experimentally established and maintained to ensure that over-emulsification does not occur, resulting in loss of indications.

7.2.2 *Water-Washable Penetrants* are designed to be directly water-washable from the surface of the test part, after a suitable penetrant dwell time. Because the emulsifier is "built-in" to the water-washable penetrant, it is extremely important to exercise proper process control in removal of excess surface penetrant to ensure against overwashing. Water-washable penetrants can be washed out of discontinuities if the rinsing step is too long or too vigorous. Some penetrants are less resistant to overwashing than others.

7.2.3 *Solvent-Removable Penetrants* are designed so that excess surface penetrant can be removed by wiping until most of the penetrant has been removed. The remaining traces should be removed with the solvent remover (see 8.6.4.1). To minimize removal of penetrant from discontinuities, care should be taken to avoid the use of excess solvent. Flushing the surface with solvent to remove the excess penetrant is prohibited.

7.3 Emulsifiers

7.3.1 *Lipophilic Emulsifiers* are oil-miscible liquids used to emulsify the excess oily penetrant on the surface of the part,

rendering it water-washable. The rate of diffusion establishes the emulsification time. They are either slow- or fast-acting, depending on their viscosity and chemical composition, and also the surface roughness of the area being examined (see 8.6.2).

7.3.2 *Hydrophilic Emulsifiers* are water-miscible liquids used to emulsify the excess oily fluorescent penetrant on the surface of the part, rendering it water-washable (see 8.6.3). These water-base emulsifiers (detergent-type removers) are supplied as concentrates to be diluted with water and used as a dip or spray. The concentration, use and maintenance shall be in accordance with manufacturer's recommendations.

7.3.2.1 Hydrophilic emulsifiers function by displacing the excess penetrant film from the surface of the part through detergent action. The force of the water spray or air/mechanical agitation in an open dip tank provides the scrubbing action while the detergent displaces the film of penetrant from the part surface. The emulsification time will vary, depending on its concentration, which can be monitored by the use of a suitable refractometer.

7.4 *Solvent Removers* function by dissolving the penetrant, making it possible to wipe the surface clean and free of excess penetrant as described in .

7.5 *Developers*—Development of penetrant indications is the process of bringing the penetrant out of open discontinuities through blotting action of the applied developer, thus increasing the visibility of the indications.

7.5.1 *Dry Powder Developers* are used as supplied (that is, free-flowing, non-caking powder) in accordance with 8.8.2. Care should be taken not to contaminate the developer with fluorescent penetrant, as the penetrant specks can appear as indications.

7.5.2 *Aqueous Developers* are normally supplied as dry powder particles to be either suspended or dissolved (soluble) in water. The concentration, use and maintenance shall be in accordance with manufacturer's recommendations (see 8.8.3).

NOTE 6—Caution: Aqueous developers may cause stripping of indications if not properly applied and controlled. The procedure should be qualified in accordance with 10.2.

7.5.3 *Nonaqueous Wet Developers* are supplied as suspensions of developer particles in a nonaqueous solvent carrier ready for use as supplied. Nonaqueous, wet developers form a coating on the surface of the part when dried, which serves as the developing medium (see 8.8.4).

NOTE 7—Caution: This type of developer is intended for application by spray only.

7.5.4 *Liquid Film Developers* are solutions or colloidal suspensions of resins/polymer in a suitable carrier. These developers will form a transparent or translucent coating on the surface of the part. Certain types of film developer may be stripped from the part and retained for record purposes (see 8.8.5).

1. Procedure

8.1 The following general processing guidelines apply (see Figs. 1-3) to both fluorescent and visible penetrant examination methods (see Fig. 4).

8.2 *Temperature Limits*—The temperature of the penetrant

materials and the surface of the part to be processed should be between 50 and 100°F (10 and 38°C). Where it is not practical to comply with these temperature limitations, qualify the procedure as described in 10.2 at the temperature of intended use and as agreed to by the contracting parties.

8.3 *Surface Conditioning Prior to Penetrant Examination*—Satisfactory results usually may be obtained on surfaces in the as-welded, as-rolled, as-cast, or as-forged conditions (or for ceramics in the densified conditions). Sensitive penetrants are generally less easily rinsed away and are therefore less suitable for rough surfaces. When only loose surface residuals are present, these may be removed by wiping with clean lint-free cloths. However, precleaning of metals to remove processing residuals such as oil, graphite, scale, insulating materials, coatings, and so forth, should be done using cleaning solvents, vapor degreasing or chemical removing processes. Surface conditioning by grinding, machining, polishing or etching shall follow shot, sand, grit or vapor blasting to remove the peened skin and when penetrant entrapment in surface irregularities might mask the indications of unacceptable discontinuities or otherwise interfere with the effectiveness of the examination. For metals, unless otherwise specified, etching shall be performed when evidence exists that previous cleaning, surface treatments or service usage have produced a surface condition that degrades the effectiveness of penetrant examination. (See A1.1.1.8 for precautions.)

NOTE 8—When agreed between purchaser and supplier, grit blasting without subsequent etching may be an acceptable cleaning method.

NOTE 9—Caution: Sand or shot blasting may possibly close discontinuities and extreme care should be used with grinding and machining operations to avoid masking discontinuities.

NOTE 10—For structural or electronic ceramics, surface preparation by grinding, sand blasting and etching for penetrant examination is not recommended because of the potential for damage.

8.4 Removal of Surface Contaminants:

8.4.1 *Precleaning*—The success of any penetrant examination procedure is greatly dependent upon the surrounding surface and discontinuity being free of any contaminant (solid or liquid) that might interfere with the penetrant process. All parts or areas of parts to be examined must be clean and dry before the penetrant is applied. If only a section of a part, such as a weld, including the heat affected zone is to be examined, all contaminants shall be removed from the area being examined as defined by the contracting parties. "Clean" is intended to mean that the surface must be free of rust, scale, welding flux, weld spatter, grease, paint, oily films, dirt, and so forth, that might interfere with the penetrant process. All of these contaminants can prevent the penetrant from entering discontinuities (see Annex on Cleaning of Parts and Materials).

NOTE 11—Caution: Residues from cleaning processes such as strong alkalis, pickling solutions and chromates, in particular, may adversely react with the penetrant and reduce its sensitivity and performance.

8.4.2 *Drying after Cleaning*—It is essential that the surface of parts be thoroughly dry after cleaning, since any liquid residue will hinder the entrance of the penetrant. Drying may be accomplished by warming the parts in drying ovens, with infrared lamps, forced hot air, or exposure to ambient temperature.

Inspection Parts

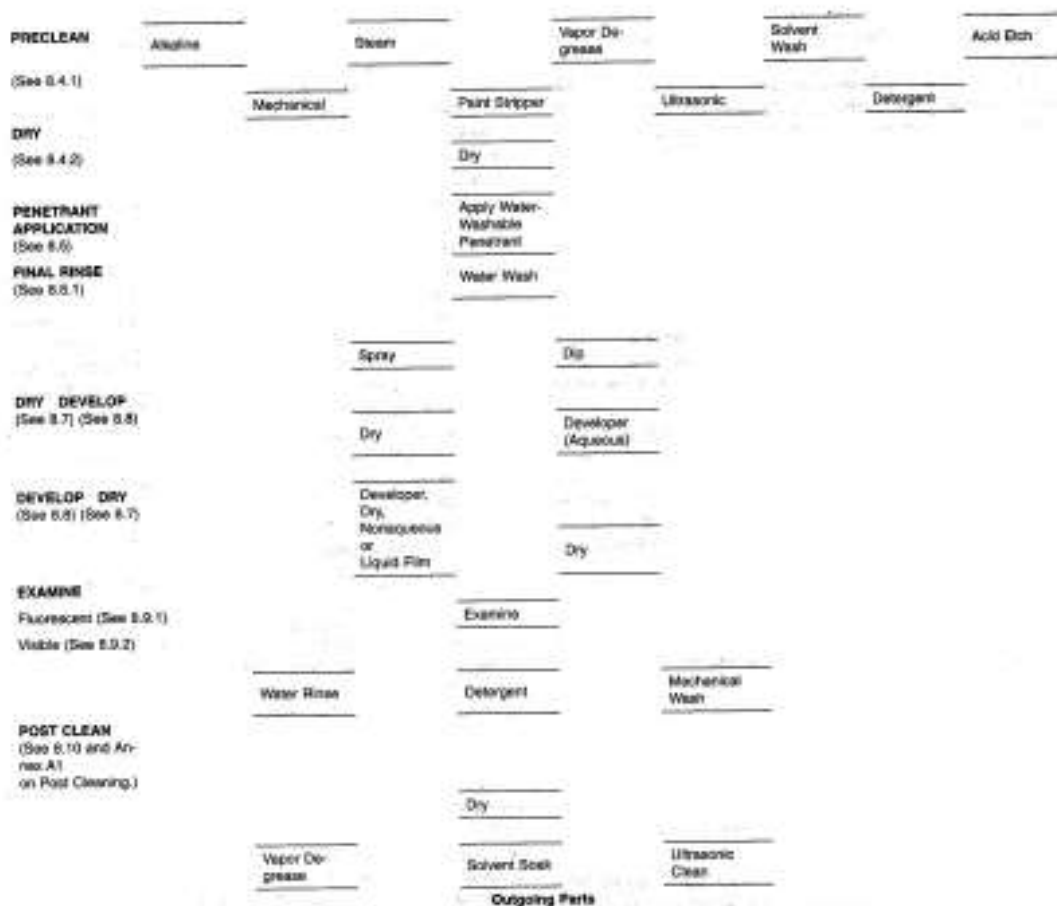


FIG. 1 General Procedure Flowchart for Penetrant Examination Using the Water-Washable Process (Test Method E 1209 for Fluorescent and Test Method E 1220 for Visible Light)

8.5 *Penetrant Application*—After the part has been cleaned, dried, and is within the specified temperature range, the penetrant is applied to the surface to be examined so that the entire part or area under examination is completely covered with penetrant.

8.5.1 *Modes of Application*—There are various modes of effective application of penetrant such as dipping, brushing, flooding, or spraying. Small parts are quite often placed in suitable baskets and dipped into a tank of penetrant. On larger parts, and those with complex geometries, penetrant can be applied effectively by brushing or spraying. Both conventional and electrostatic spray guns are effective means of applying liquid penetrants to the part surfaces. Electrostatic spray application can eliminate excess liquid build-up of penetrant on

the part, minimize overspray, and minimize the amount of penetrant entering hollow-cored passages which might serve as penetrant reservoirs, causing severe bleedout problems during examination. Aerosol sprays are conveniently portable and suitable for local application.

NOTE 12—**Caution:** Not all penetrant materials are suitable for electrostatic spray applications, so tests should be conducted prior to use.

NOTE 13—**Warning:** With spray applications, it is important that there be proper ventilation. This is generally accomplished through the use of a properly designed spray booth and exhaust system.

8.5.2 *Penetrant Dwell Time*—After application, allow excess penetrant to drain from the part (care should be taken to prevent pools of penetrant from forming on the part), while

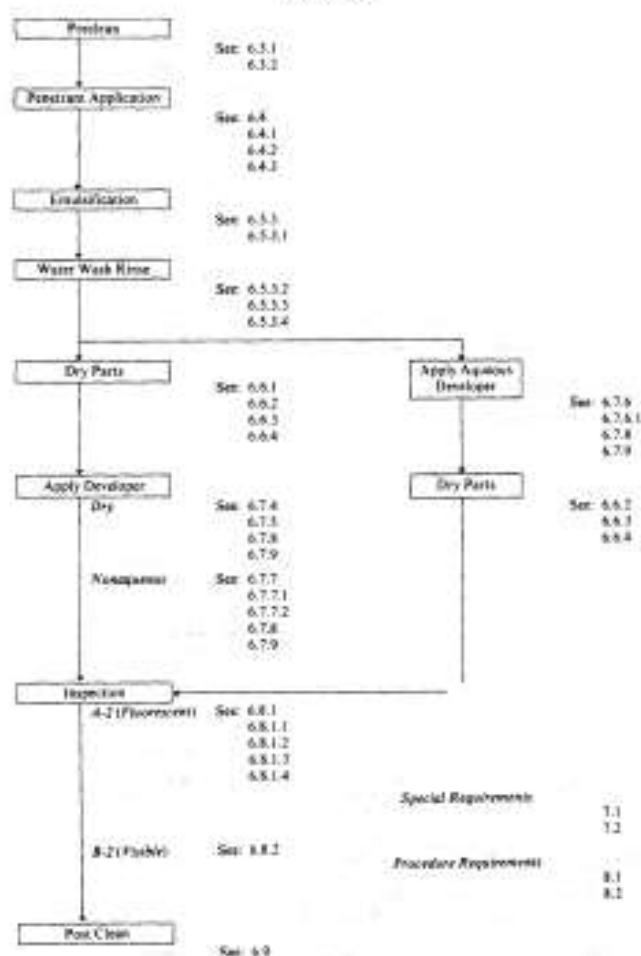


FIG. 2 Type 2—Post Emulsifiable Procedures A-2 (Fluorescent) and B-2 (Visible)

allowing for proper penetrant dwell time (see Table 2). The length of time the penetrant must remain on the part to allow proper penetration should be as recommended by the penetrant manufacturer. Table 2, however, provides a guide for selection of penetrant dwell times for a variety of materials, forms, and types of discontinuity. Unless otherwise specified, the dwell time shall not exceed the maximum recommended by the manufacturer.

Note 14—For some specific applications in structural ceramics (for example, detecting parting lines in slip-cast material), the required penetrant dwell time should be determined experimentally and may be longer than that shown in Table 1 and its notes.

8.6 Penetrant Removal

8.6.1 Water Washable

8.6.1.1 Removal of Excess Penetrant—After the required penetration time, the excess penetrant on the surface being

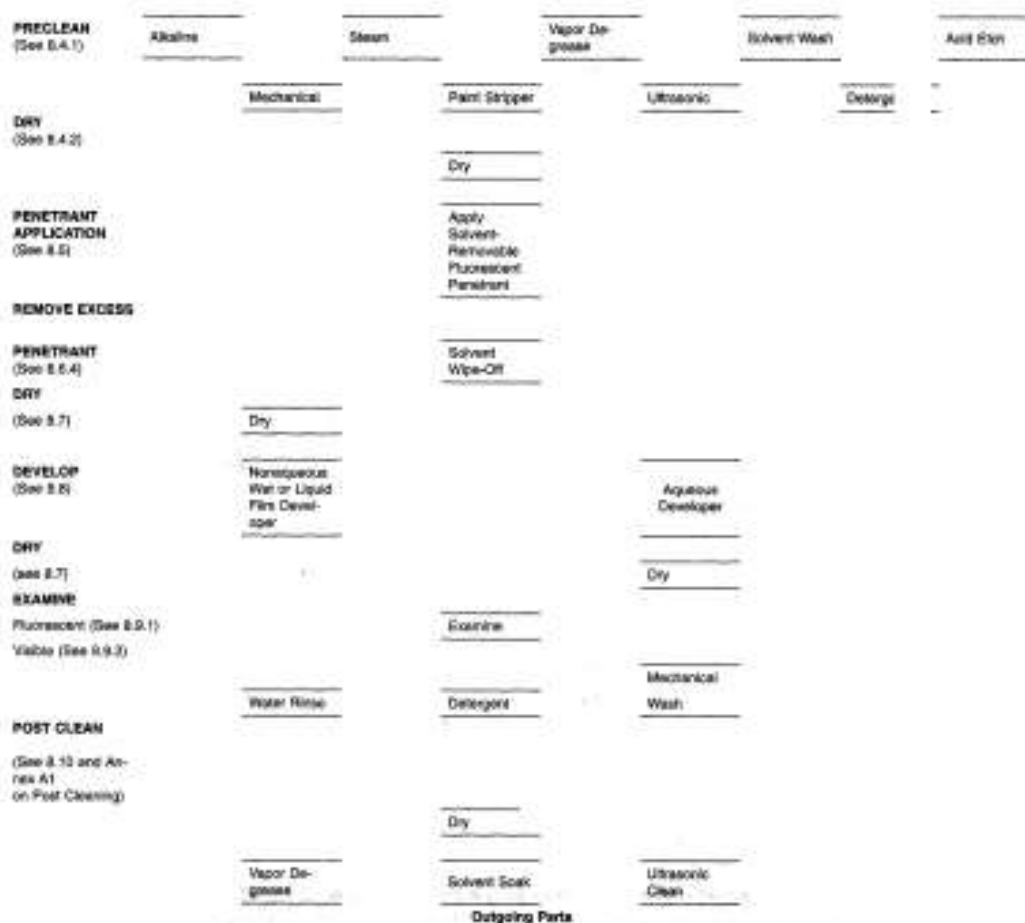
examined must be removed with water, usually a washing operation. It can be washed off manually, by the use of automatic or semi-automatic water-spray equipment or by immersion. For immersion rinsing, parts are completely immersed in the water bath with air or mechanical agitation. Accumulation of water in pockets or recesses of the surface must be avoided. If the final rinse step is not effective, as evidenced by excessive residual surface penetrant after rinsing, dry (see 8.7) and reclean the part, then reapply the penetrant for the prescribed dwell time.

(a) The temperature of the water should be relatively constant and should be maintained within the range of 50 to 100°F (10 to 38°C).

(b) Spray-rinse water pressure should not be greater than 40 psi (280 kPa).

(c) Rinse time should not exceed 120 s unless otherwise

Incoming Parts



Outgoing Parts

FIG. 3 Solvent-Removable Penetrant Examination General Procedure Flowsheet (Test Method E 1219 for Fluorescent and Test Method E 1220 for Visible Light)

specified by part of material specification.

Note 15—**Caution:** Avoid overwashing. Excessive washing can cause penetrant to be washed out of discontinuities. With fluorescent penetrant methods perform the rinsing operation under black light so that it can be determined when the surface penetrant has been adequately removed.

8.6.1.2 *Removal by Wiping*—In special applications, penetrant removal may be performed by wiping the surface with a clean, absorbent material dampened with water until the excess surface penetrant is removed, as determined by examination under black light for fluorescent methods and white light for visible methods.

8.6.2 *Lipophilic Emulsification:*

8.6.2.1 *Application of Emulsifier*—After the required penetration time, the excess penetrant on the part must be emulsified by immersing or flooding the parts with the required emulsifier (the emulsifier combines with the excess surface penetrant and makes the mixture removable with water rinsing). After application of the emulsifier, the parts are drained in a manner that prevents the emulsifier from pooling on the part(s).

8.6.2.2 *Emulsification Dwell Time* begins as soon as the emulsifier has been applied. The length of time that the emulsifier is allowed to remain on a part and in contact with the penetrant is dependent on the type of emulsifier employed and