



UNIVERSIDAD
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL
PIRHUA

ESTUDIO DEL DESPRENDIMIENTO CATÓDICO DE RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS APLICADOS EN SUPERFICIES DE ACERO

Luis Guillermo Navarrete Valles

Piura, 04 de Febrero de 2008

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área Departamental de Ingeniería Industrial y Sistemas

Febrero 2008



Esta obra está bajo una [licencia](#)
[Creative Commons Atribución-](#)
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura

U N I V E R S I D A D D E P I U R A

FACULTAD DE INGENIERÍA

Programa Académico de Ingeniería Industrial y de Sistemas



**“Estudio del desprendimiento catódico de recubrimientos orgánicos aplicados
en superficies de acero”**

**Tesis para optar el Título de
Ingeniero Industrial y de Sistemas**

Luis Guillermo Navarrete Valles

Asesor: Ing. Osby García S.

Piura, Enero 2008

A Dios por darme la fortaleza y la esperanza en esta vida, a mis padres, en especial a mi madre por su eterno apoyo y esmerada dedicación, a mi hermana July por su adorable preocupación y a Ingrid por su comprensión y por llenar mis momentos de tristeza con alegría.

Prólogo

Es un hecho común el observar la gradual destrucción de los materiales de distintas plantas industriales que trabajan con metales como el acero, el cual es el más utilizado, debido a que se encuentra en sus maquinarias, equipos, tanques y tuberías. Cuando el producto presenta un aspecto diferente al original, lo asociamos con oxidación o corrosión que es considerada como una enfermedad ya que, en mayor o menor grado, la llegan a padecer los equipos, y lamentablemente hasta entonces, se aplican soluciones correctivas caras, muchas veces estas no son idóneas, más aun en algunos casos no se cumple con las normas y supervisión indicada.

En las estructuras o tuberías de acero enterradas y/o sumergidas, existen muchas formas de corrosión, producidas por diferentes causas que inciden en el deterioro del metal. Diversos factores afectan sustancialmente el tipo y velocidad de corrosión de una estructura en contacto con el suelo o con los diferentes ambientes que la rodean. Por esto, existen varios métodos para prevenir y controlar la corrosión, como por ejemplo las barreras físicas (pinturas, “linings”, etc), inhibidores de corrosión, sistemas de protección catódica (PC) y los sistemas duales como pinturas-protección catódica, entre otros.

Este último método de protección, tiene como inconveniente, que a potenciales muy negativos (inferiores a -1500 mV), se produzca el ampollamiento de los recubrimientos de pintura, debido a la formación o desprendimiento de hidrógeno (H_2) en la superficie metálica. Esto origina un incremento del área a proteger y el deterioro de las capas de pintura y por consiguiente, la posibilidad de corrosión de la estructura enterrada y/o sumergida.

Debido a esto, muchos fabricantes de pinturas a nivel internacional, vienen dando como característica del recubrimiento, la resistencia al desprendimiento catódico de los mismos. Esta característica, no se encuentra disponible en las hojas técnicas de pinturas de los fabricantes locales o nacionales. Otra consideración a tener en cuenta, es que las empresas internacionales de la rama petrolera, pesquera o petroquímica, caracterizan, por lo general, directamente las diferentes marcas de pinturas de acuerdo a sus requerimientos, hecho que no se observa en el Perú, ya que, por contrario, no existe una preocupación por estudiar las propiedades de los diferentes recubrimientos disponibles en el mercado. Sin embargo, en algunas instalaciones industriales a nivel nacional donde se aplican sistemas de protección catódica, se está optando por utilizar una protección mixta con recubrimientos epóxicos, con mejoras considerables, tal como se ha demostrado en la industria extranjera.

Es entonces, que esta tesis tiene como objeto primordial, someter los recubrimientos a diferentes potenciales para evaluar su comportamiento frente a la protección catódica, teniendo como base la normativa internacional, como es la norma ASTM G8. Los resultados obtenidos constituyen una guía que ayudará a seleccionar un sistema de protección anticorrosivo eficaz para estructuras enterradas y/o sumergidas. Esto se relaciona directamente con una considerable reducción de costos para las empresas, y los beneficios que esto conlleva a la producción.

Para finalizar, quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad de Piura que hizo posible el desarrollo del presente trabajo, a mi asesor el Ing. Osby García Saldarriaga, al personal del laboratorio de metalotecnia y corrosión como son la Dra. Ing. Rosalba Guerrero Aslla y en especial al señor Eduardo Mejía Rivas que con su esmerada dedicación y amplio conocimiento del tema, promovieron y apoyaron en todo momento hasta su culminación el desarrollo de este proyecto. Quiero extender también mi agradecimiento a la empresa Petroperú, que proporcionó el material para realizar el estudio, y a todas las personas que de alguna manera hayan colaborado en la elaboración de esta tesis.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo, evaluar la influencia de la protección catódica en la adherencia de los recubrimientos aplicados sobre estructuras de acero enterradas y sumergidas. El estudio se enfocará a evaluar la susceptibilidad o resistencia al desprendimiento catódico, siguiendo estándares de ensayo. Para ello se ha planteado la evaluación de ocho diferentes marcas y tipos de pinturas de fabricación nacional, las cuales se sometieron a las mismas condiciones de prueba, para poder determinar, al finalizar el período de ensayo, cual de ellas obtuvo la mayor capacidad de resistencia al desprendimiento catódico.

La prevención de la corrosión exterior en superficies enterradas y sumergidas, se llevó a cabo mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos, complementados con sistemas de protección catódica. Más aún, se obtuvo información acerca de las características en cuanto a estándares de potencial y corriente de cada recubrimiento para potenciar los resultados.

La importancia del presente trabajo redonda, en definir las condiciones que generan deterioro de los recubrimientos combinados con sistemas de protección catódica. Se ha tenido presente que la función de los recubrimientos es aislar la superficie externa del metal de las superficies enterradas y sumergidas del medio circundante, con la finalidad de evitar la incidencia de corrosión, reducir los requerimientos de corriente de protección catódica y mejorar la distribución de la misma.

Índice

Dedicatoria	
Prólogo	
Resumen	
Índice	
Introducción	1
Capítulo I: <i>Corrosión en estructuras enterradas y estructuras sumergidas.</i>	
1.1 Corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.....	4
1.1.1 Generalidades.....	4
1.1.2 Mecanismo básico de la corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.....	6
1.1.3 Características del terreno y morfología de la corrosión.....	11
1.1.4 Influencia de la resistividad del terreno.....	12
1.1.5 Medida del potencial de estructuras enterradas y sumergidas....	12
1.1.6 Causas de la corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.....	15
1.1.6.1 Heterogeneidad del metal.....	15
1.1.6.2 Heterogeneidad del electrolito.....	17
1.1.6.3 Efectos de corrientes erráticas o vagabundas.....	21
1.1.7 Factores que influyen en la corriente de corrosión.....	22
1.1.8 Relación entre las áreas anódicas y catódicas.....	23

Capítulo II: *Recubrimientos de protección anticorrosiva.*

2.1 Recubrimientos protectores.....	24
2.1.1 Fundamentos y generalidades de los recubrimientos Protectores.....	24
2.1.2 Mecanismos generales de protección de las películas de recubrimientos.....	28
2.1.3 Componentes básicos de un recubrimiento.....	28
2.1.4 Tipos de recubrimientos.....	33
2.1.4.1 A partir del procedimiento que requiere el recubrimiento.....	34
2.1.4.2 Por el tipo de resina usada en la fabricación.....	34
2.1.4.3 Por el modo de llevar a cabo el secado y endurecimiento después de su aplicación.....	38
2.2 Selección para recubrimientos anticorrosivos en estructuras enterradas y/o sumergidas.....	39
2.2.1 Antecedentes de funcionalidad.....	39
2.2.2 Temperatura de operación.....	40
2.2.3 Tipo de suelo y/o agua.....	40
2.3 Preparación de superficies.....	40
2.3.1 Criterios de aceptación.....	42
2.3.2 Tipos de limpieza.....	43
2.3.2.1 Limpieza química.....	43
2.3.2.2 Limpieza con solvente.....	43
2.3.2.3 Limpieza manual.....	44
2.3.2.4 Limpieza con abrasivos.....	45
2.3.2.5 Limpieza con herramientas mecánicas.....	50
2.3.2.6 Limpieza con flama.....	51
2.3.2.7 Limpieza por agentes atmosféricos.....	51
2.4 Sistemas de aplicación de recubrimientos.....	51
2.4.1 Criterios para la aplicación de recubrimientos.....	52
2.4.1.1 Restricciones en la aplicación.....	52
2.4.1.2 Inspección antes, durante y después de la aplicación.....	53
2.4.2 Métodos de aplicación.....	54
2.4.2.1 Aplicación con brocha de pelo y rodillo.....	55
2.4.2.2 Aplicación por aspersión.....	57
2.4.2.3 Aplicación con spray.....	58

Capítulo III: *Sistemas de protección anticorrosiva con protección catódica.*

3.1 Protección catódica.....	60
3.1.1 Generalidades, principio y fundamento de la protección catódica.....	60
3.1.2 Criterios para la protección catódica.....	63
3.1.2.1 Potencial estructura/electrolito mínimo permisible.....	63
3.1.2.2 Potencial estructura/electrolito máximo permisible.....	65
3.1.3 Criterios para diseño de protección catódica en estructuras enterradas y/o sumergidas.....	66
3.1.4 Tipos de protección catódica.....	67
3.1.5 Corriente requerida para la protección.....	76

3.2	Uso de recubrimientos protectores complementado con protección catódica.....	77
3.2.1	Generalidades y consideraciones de la sobreprotección.....	77
3.2.2	Factores a los cuales debe mostrar resistencia la sobreprotección.....	78
3.2.3	Aislamiento e interferencias eléctricas que se dan en los sistemas duales de protección.....	78
3.3	Generación de gas por electrólisis.....	79
3.3.1	Fundamentos y aspectos generales de la electrólisis.....	79
3.3.2	Generación y desprendimiento de gas.....	80
3.3.3	Desprendimiento catódico en tuberías enterradas y/o sumergidas.....	81
3.3.4	Control y medidas de seguridad.....	81

Capítulo IV: *Parte experimental.*

4.1	Preparación del espécimen de prueba.....	83
4.1.1	Preparación de la superficie de las probetas.....	92
4.1.2	Recubrimientos aplicados.....	92
4.1.3	Sistema de aplicación de los recubrimientos.....	94
4.2	Equipos utilizados.....	94
4.3	Materiales y reactivos.....	97
4.4	Procedimiento de ensayo.....	97
4.4.1	Descripción del procedimiento.....	97
4.4.1.1	Selección del recipiente de prueba.....	97
4.4.1.2	Cálculos de los reactivos utilizados.....	100
4.4.1.3	Preparación previa de las probetas.....	100
4.4.1.4	Construcción del sistema final.....	102
4.4.2	Ensayos realizados.....	103
4.4.3	Período de monitoreo.....	105
4.4.3.1	Medición del potencial (E2) entre el espécimen y el electrodo de referencia.....	105
4.4.3.2	Medición de la corriente (I1).....	105
4.4.3.3	Medición del potencial polarizado (E1).....	105
4.4.4	Criterio de evaluación.....	106

Capítulo V: *Cálculos y resultados.*

5.1	Informe final.....	107
5.1.1	Medición y recopilación de datos.....	108
5.1.1.1	Identificación del espécimen.....	108
5.1.1.2	Resistencia eléctrica relativa en los especímenes de prueba.....	115
5.1.1.3	Resultados en el inicio, durante y al final del ensayo de exposición.....	115
A)	Resultados del potencial E1 y E2.....	115
B)	Cálculos realizados con el potencial E2.....	118
C)	Variación del potencial.....	119
D)	Resultados de la corriente I1 y del potencial total Et....	124
E)	Cálculo de la densidad de corriente del sistema.....	124

5.1.2 Gráficas experimentales.....	126
5.1.2.1 Gráficas de potencial E2 vs corriente I1.....	126
5.1.2.2 Gráfica de corriente I1 vs tiempo.....	131
5.1.2.3 Gráfica de potencial total Et vs tiempo.....	131
5.1.2.4 Gráfica de potencial total Et vs corriente I1.....	132
5.1.2.5 Gráfica de densidad de corriente vs tiempo.....	133
5.1.2.6 Gráficas de variación de potencial ΔE_2 vs días.....	133
5.2 Discusión de resultados.....	134
Conclusiones.....	137
Sugerencias.....	139
Bibliografía.....	140
Anexos.....	144

Introducción

Esta tesis se ha desarrollado en cinco capítulos, los cuales a su vez se han subdividido en dos partes: la parte teórica, que consta de los tres primeros capítulos y la parte experimental, conformada por el Cuarto y Quinto capítulo; para finalizar con las conclusiones y sugerencias.

El Primer capítulo inicia la parte teórica con un amplio análisis de la corrosión en tuberías enterradas y/o sumergidas, describiéndose de manera clara y completa puntos importantes como es el mecanismo básico de la corrosión. Este capítulo le da un acercamiento general al lector sobre sucesos y conceptos básicos referidos al campo de la corrosión, de tal manera que pueda comprender la problemática cuyo objeto principal de análisis se verá en los capítulos experimentales. Este capítulo se ocupa, además de describir las causas de la corrosión, el proceso de la corrosión electroquímica y la morfología de la corrosión; los diferentes tipos de terreno que se pueden encontrar, la influencia de la resistividad del terreno y la medida del potencial.

El Segundo capítulo, desarrolla uno de los más importantes tipos de protección de superficies metálicas como son los recubrimientos anticorrosivos. Se estudia a fondo su fundamento, sus componentes, su mecanismo y los variados tipos de recubrimientos que hay en el mercado. En base a ello, se extraen los requerimientos necesarios e ineludibles a tener en cuenta a la hora de seleccionar un buen recubrimiento, teniendo en cuenta factores como el suelo, la temperatura y su funcionalidad. Seguidamente, se estudia la preparación de la superficie metálica, previa a la aplicación del recubrimiento, en la que encontramos los diferentes métodos de limpieza a la que puede ser sometida una

superficie metálica. Finalmente, veremos los sistemas de aplicación de recubrimientos, los criterios para una buena aplicación y los diferentes métodos que hay en la industria.

El Tercer capítulo, trata el más importante sistema de protección contra la corrosión, y además el más usado actualmente en la industria donde se utilizan tuberías o estructuras enterradas y/o sumergidas. Me refiero a la protección catódica. Este capítulo expone cómo se les otorga una protección eléctrica, protección catódica, a las superficies metálicas inicialmente recubiertas con una pintura. El principio y fundamento de la protección catódica, los criterios de ésta, así como también los criterios para construir un buen sistema, los dos tipos que se usan en la industria, así como sus ventajas y desventajas. Este tema está relacionado con la generación de gas que se da por la electrólisis, sus fundamentos y cómo se origina la formación de hidrógeno y el desprendimiento catódico (punto importante a analizar experimentalmente) en la superficies enterradas y/o sumergidas. Se concluye con algunas medidas de seguridad necesarias a tener en cuenta.

El Cuarto capítulo introduce la parte experimental por lo que cuenta con diversas fotos tanto de las probetas como de la etapa previa al proceso experimental. Inicialmente se describe en detalle las características de los especímenes de prueba empleados, así como también una descripción de los equipos utilizados y su aplicación, finalizando con los materiales y reactivos empleados. Además, se ilustra un esquema de cómo se ha realizado el ensayo. Seguidamente, se especifica cuál ha sido el procedimiento del ensayo seguido, en el que se describe minuciosamente cómo se obtienen los resultados extraídos de las medidas del recipiente y cantidades de los reactivos, teniendo en cuenta la norma ASTM G8. Posteriormente se señala la preparación de las probetas, considerando la norma ASTM G8, G12, G62, así como la construcción final del sistema. Por último, se describe la evolución y el monitoreo periódico del ensayo.

En el Quinto capítulo y el último de esta tesis, se hace una recopilación de todos los datos registrados durante el desarrollo del ensayo. Se hace una identificación del espécimen de prueba, sobre el cual se realizó un minucioso examen físico y visual de las probetas al finalizar el período de prueba. Se muestran los resultados registrados del potencial E1 (primer día) y E2 tomados cada día del ensayo, considerando sólo los días hábiles, resultados que se exponen en las tablas 5.7 y 5.8. Una vez realizados los registros, se exponen los cálculos realizados con el potencial E2, así como los valores máximos, los valores mínimos y el promedio, en cada una de las probetas. Por otro lado, para observar y analizar los incrementos positivos o negativos de potencial de las probetas, se procedió a hallar el diferencial de potencia ΔE (de E2 con respecto a E1), para ver la variación de potencial de los días hábiles con respecto al primer día, así como también el diferencial de potencia ΔE_2 , para ver la variación de un día hábil a otro. Después se hace una recopilación de los datos registrados de la corriente I1 y del potencial total Et; estos datos se consolidan en una tabla junto con los cálculos de los valores máximos, los valores mínimos y el promedio. Con los datos de la corriente se procedió a calcular la densidad de corriente del sistema, para cada día tal como se muestra en la tabla 5.15. Con el propósito de hacer más manifiestos los resultados, he elaborado varias gráficas que creí conveniente realizar con los datos ya registrados y los cálculos realizados anteriormente, que esclarecen de manera didáctica y ayudan a completar la información que se pretende dar a la culminación del ensayo. Cerrando este capítulo, se plantea una discusión acerca de los datos obtenidos en el ensayo, la misma que me lleva a finalizar este capítulo con un comentario el cual analiza las

características que presentan algunas probetas al terminar el período de prueba, así como también explica algunos datos registrados durante el ensayo tomados de las tablas y gráficas adjuntas, sustentando mi posición en la investigación teórica revisada en los primeros capítulos de esta tesis.

Se concluye finalmente esta tesis, presentando las conclusiones y sugerencias de rigor recogidas durante la realización del presente trabajo de tesis.

Como parte final encontramos los apéndices A, B, C, D, E, F, G y H. El apéndice A contiene una tabla con la serie galvánica, en donde se puede apreciar el lugar que ocupan en esta serie los distintos tipos de metales. El apéndice B se ha subdividido en dos apéndices B1 y B2. En el apéndice B1 se muestra las primeras tablas con los resultados de las medidas de todas las probetas y los resultados de la medición de espesores según la norma ASTM G12. En el apéndice B2 se muestran las segundas tablas con los resultados de la prueba de detección de defectos según la norma ASTM G62, así como también las observaciones de la inspección visual que se le hizo a cada probeta con respecto a la pintura. En el apéndice C se muestran las tablas con los resultados de las dimensiones de las áreas desnudas acompañadas de fotos ilustrativas, solamente de las probetas que presentaron este daño. En el apéndice D se muestran las tablas con los resultados de las resistencias eléctricas relativas de verificación de continuidad de cada espécimen. En el apéndice E se muestran las tablas con la corriente de protección requerida y la densidad de corriente para cada recubrimiento en particular, además de fotos ilustrativas. En el apéndice F se muestran las fotos de las probetas al finalizar el período de prueba, antes de comenzar el examen físico. En el apéndice G se muestran las gráficas de variación de potencial ΔE_2 vs días mencionadas en el capítulo V, y por último, en el apéndice H se muestra una copia de la norma ASTM G8.

Capítulo I

Corrosión en estructuras enterradas y estructuras sumergidas.

1.1 Corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.

1.1.1 Generalidades.

La corrosión es la principal causa de fallas en tuberías enterradas y sumergidas alrededor del mundo. Debo comenzar por definir, que una tubería enterrada y/o sumergida es aquella que está alojada bajo la superficie del terreno o en el lecho de un cuerpo de agua (pantano, río, laguna, lago, etc.), aunque exceptuamos del objeto de esta tesis las tuberías instaladas en el lecho marino. Cuando una tubería falla, ocasiona grandes impactos en términos de pérdidas de producción, daños a la propiedad, contaminación y riesgo a vidas humanas. Es por ello que en éste capítulo haremos un minucioso estudio de los fenómenos que ocurren y que existen en relación a este tema.

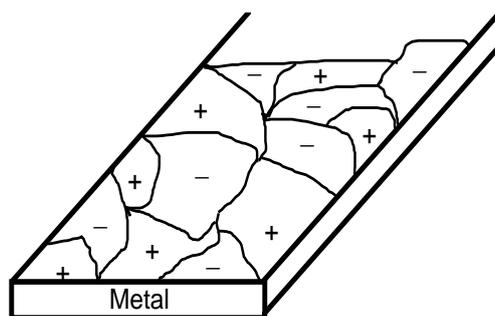


Figura 1.1. Vista amplia de una superficie metálica donde se aprecian los “granos” en su superficie.

Pues bien, una definición general de lo que se conoce por corrosión húmeda es, todo proceso electro-químico de degradación por oxidación-reducción, que ocurre por la interacción de un metal (materiales de construcción, tanques, tuberías y estructuras enterradas, sumergidas o en contacto con un medio conductor) con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas, es decir, el deterioro de un material a consecuencia de un ataque químico por su entorno.

Una tubería de acero vista al microscopio presenta una configuración similar a la que mostramos en la figura 1.1, es decir, granulada. Cada uno de estos “granos”, de acuerdo al proceso de fabricación y calidad del material, se comportan como un electrodo con una tendencia anódica o catódica específica.

Las características fundamentales del fenómeno de la corrosión, como ya describiremos detalladamente más adelante, sólo ocurre en presencia de un electrolito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas zonas anódicas ó catódicas. Una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y consecuentemente, en la región catódica la inmunidad del metal.

Una buena aproximación para el estudio del comportamiento de estructuras enterradas y/o sumergidas la constituyen los diagramas de potencial de reducción (**Eh**) contra acidez (**pH**), o también llamados de *Pourbaix*, en honor a quien los introdujo. En éstos, se observan distintas zonas de estabilidad, entre las que cabe distinguir las de inmunidad, de corrosión activa y de pasividad. Teniendo en claro los dos primeros sucesos, el último se define como la pérdida de reactividad química de ciertos metales y aleaciones bajo ciertas condiciones del ambiente que los rodea, de tal forma que llegan a ser inertes. A continuación presentamos un diagrama Eh-pH del hierro (**Fe**) en contacto con el agua:

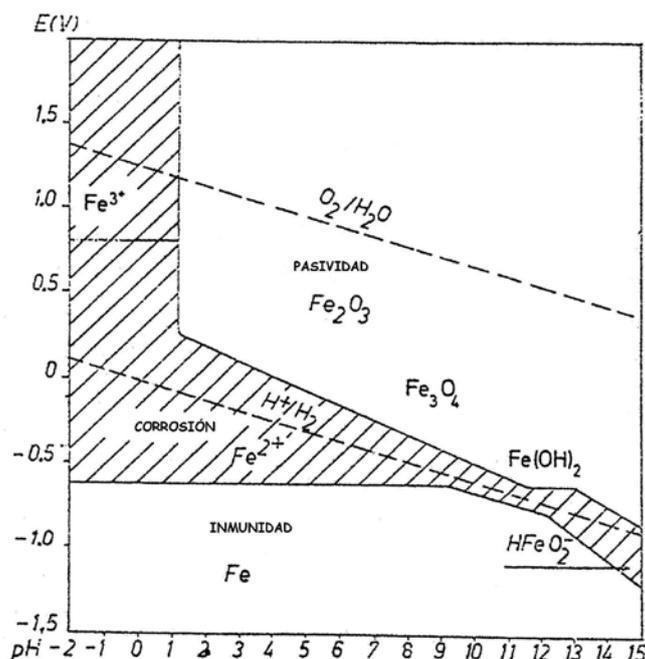


Figura 1.2. Diagrama Eh-pH o de Pourbaix del hierro en contacto con el agua¹.

Recordemos, que en una celda electroquímica o celda galvánica (metal-electrolito-metal) se produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, por tanto, decimos que tenemos una celda galvánica o pila. Si, en cambio, la celda electroquímica consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que tenemos una celda electrolítica.

1.1.2 Mecanismo básico de la corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.

La causa de la corrosión en tuberías enterradas y/o sumergidas se debe generalmente a la corrosión galvánica, que es un tipo de corrosión húmeda, por lo que podemos afirmar que la corrosión en tuberías enterradas y/o sumergidas es de naturaleza electroquímica. La corrosión galvánica se produce cuando dos metales unidos eléctricamente están expuestos a un electrolito (medio corrosivo), el cual puede ser constituido por el suelo o el agua; de tal modo que se produce un flujo de electrones donde el metal menos noble (ánodo), protege al metal más noble (cátodo)². Para efectuar un análisis de la corrosión galvánica, uno de los aspectos más importantes es conocer la posición de los metales dentro de la serie galvánica³. Todo el procedimiento de la corrosión galvánica tiene lugar en una celda electroquímica.

Para que ocurra este tipo de corrosión se deben cumplir condiciones mínimas que a continuación se detallan:

1. Debe haber una zona anódica o ánodo (que sufre la corrosión) y una zona catódica o cátodo sobre la superficie metálica donde ocurre la reducción de especies iónicas

¹ Costa, Wranglen. "An introduction to corrosion and protection of metals". Gran Bretaña: London Butler Tanner, 1ra. ed., 1972. 287 pp.

² Saavedra Cornejo, Walter Enrique. "Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano". Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. 6 pp.

³ Cfr. Anexo A.

2. Debe haber un conductor metálico que conecte de forma eléctrica el ánodo y el cátodo.
3. Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad.

Una vez cumplidas estas condiciones, puede circular una corriente eléctrica dando lugar a un consumo de metal (corrosión) en el ánodo.

El término ánodo (material más electronegativo), se emplea pues para describir aquella porción de una superficie metálica en donde ocurre la corrosión (disolución) y en la cual se liberan electrones (reacciones de oxidación), y en consecuencia el paso del metal en forma de iones al electrolito. Como los electrones, en un conductor metálico, se mueven en sentido contrario al convencional⁴, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para ingresar a la solución como podemos apreciar en la figura 1.3. El término cátodo (material más electropositivo), se aplica a la porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo, se combinan con determinados iones presentes en el electrolito (reacciones de reducción)⁵.

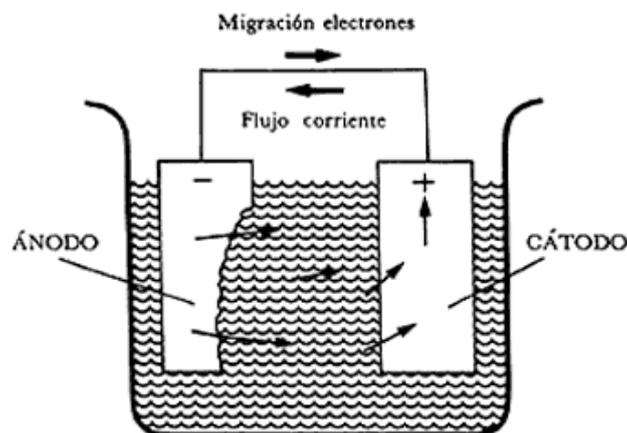


Figura 1.3. Migración de electrones del ánodo al cátodo en dirección contraria a la corriente eléctrica.

Para el caso de la tubería enterrada, el medio de transporte de electrones (electrolito) lo conforma el suelo y la tubería misma.

⁴ El sentido de una corriente eléctrica se define como el sentido del movimiento de las cargas libres. Sin embargo, surge la dificultad de que en un conductor electrolítico están en movimiento en sentidos opuestos cargas libres de ambos signos (cationes y aniones). Cualquiera que fuera el sentido asignado a la corriente, habría cargas moviéndose en sentido opuesto. Ya que ha de adoptarse algún convenio, se ha coincidido en hablar del sentido de una corriente como si los portadores fueran todas cargas positivas. En un conductor metálico, sólo son libres las cargas negativas o electrones libres. De aquí que toda la corriente en un conductor metálico se produce por el movimiento de cargas negativas y, por tanto, los electrones se mueven en sentido opuesto al convencional.

- Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre*”. 1986, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 9. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_7.html

⁵ *Ibíd.*



Figura 1.4. Tubería enterrada, la zona con tendencia anódica cede electrones y la zona de tendencia catódica los recibe.

Podemos decir entonces que, toda reacción de corrosión que transcurre según un mecanismo electroquímico, consta, al menos, de dos reacciones parciales, una anódica de oxidación y otra catódica de reducción, que pueden formularse como sigue:



Las reacciones (1.2) y (1.3) son los procesos parciales catódicos más importantes de la naturaleza. Normalmente los equilibrios anteriores en los fenómenos de corrosión están totalmente desplazados hacia la derecha⁶.

En la Figura 1.5 se grafica el proceso de corrosión que se da en una celda galvánica. Ahí se puede notar que la diferencia de potencial existente entre ánodo y cátodo, origina la migración de electrones desde el ánodo al cátodo a través de la conexión metálica existente⁷. En el ánodo, al perder electrones quedan iones de hierro cargados positivamente, (Fe^{2+}), tal como se aprecia en la reacción (1.4), los cuales pueden combinarse con iones cargados negativamente, OH^{-} (iones hidroxilo) que es la formación de los electrones que fluyen a través del acero al combinarse con el oxígeno y el agua, (reacción (1.5)), proporcionada por soluciones acuosas neutras o alcalinas, o el suelo húmedo. Estos iones hidroxilo se encuentran en las inmediaciones del ánodo.

Cuando se combinan los iones hidroxilo con los iones ferrosos en el ánodo forman ocasionalmente hidróxido ferroso, ($Fe(OH)_2$) como se aprecia en la reacción (1.6), el cual puede reaccionar con posterioridad para formar, por una parte, hidróxido férrico, ($Fe(OH)_3$), familiarmente conocido como herrumbre, y a la vez óxido férrico (Fe_2O_3). Dicha reacción se da en presencia de agua además de otras especies como podemos apreciar en las reacciones (1.7) y (1.8), que tienen lugar también en el cátodo.

⁶ De Lama Agramonte, Julio Carlos Hernán. "Evaluación de inhibidores de corrosión en concreto ante la presencia de iones cloruros". Tesis (Títulado en Ingeniería Industrial y de Sistemas). Piura: Universidad de Piura, 2002. 46 pp.

⁷ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 14.

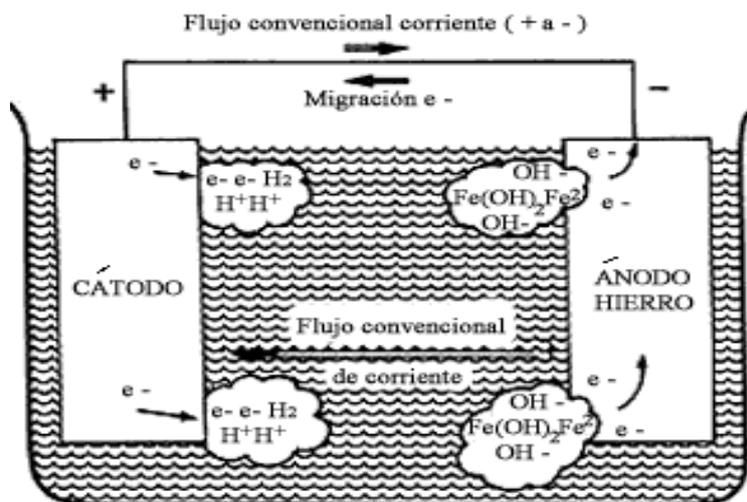


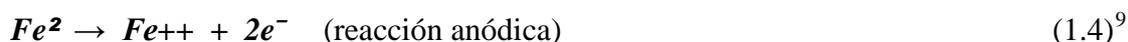
Figura 1.5. Proceso electroquímico de la corrosión visto en una celda electrolítica.

En el cátodo y procedentes del ánodo, van llegando a través del conductor metálico externo, los electrones. Estos, cargados negativamente, al llegar a la interfase cátodo-solución, se combinan con los iones hidrógeno cargados positivamente, H^+ del medio corrosivo, para formar hidrógeno gas, H_2 . Cuando los iones hidrógeno se convierten en hidrógeno gaseoso por la combinación de estos con los electrones procedentes del ánodo, se crea un exceso de iones OH^- en las inmediaciones del cátodo más aún por la reducción del oxígeno. Este exceso de iones OH^- hace que aumente la alcalinidad y, por tanto, el pH del electrolito adyacente al cátodo⁸.

Los electrones que salen del ánodo son consecuencia de las reacciones de oxidación que ocurren en éste, la llegada de estos electrones al cátodo origina reacciones de reducción en las moléculas o iones del electrolito.

A continuación describiremos las ecuaciones que se dan en el proceso electroquímico:

1) La reacción anódica en la cual el hierro se oxida a iones ferrosos es:



2) La reacción catódica en la cual el oxígeno se reduce a iones OH^- es:



⁸ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre". 1986, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 9. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_7.html

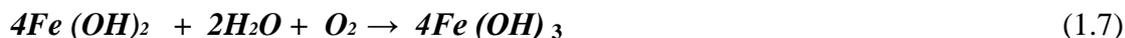
⁹ Seminario Vega, Oswaldo Víctor. "Evaluación de la corrosión en postes de concreto armado de la urbanización los Tallanes". Tesis (Título en Ingeniería Mecánica-Eléctrica). Piura: Universidad de Piura, 2003. 13 pp.

¹⁰ Ibídem.

3) Reacción del hidróxido ferroso:



4) Reacciones adicionales:



La incidencia de estas reacciones es, que los productos de corrosión ocupan un gran volumen en comparación con el acero original. Así lo indica la tabla siguiente:

Tabla 1.1. Volumen relativo de varios productos de corrosión¹³.

<i>Producto</i>	<i>Volumen aproximado</i>
<i>Fe(acero original)</i>	<i>1.0</i>
<i>FeO</i>	<i>1.8</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>2.1</i>
<i>Fe₃O₄</i>	<i>2.2</i>
<i>Fe(OH)₂</i>	<i>3.6</i>
<i>Fe(OH)₃</i>	<i>4.2</i>
<i>Fe(OH)₃ .3H₂O</i>	<i>6.4</i>

Desde un punto de vista conceptual, hay algunos puntos de importancia que conviene aclarar en lo que respecta al flujo de la corriente eléctrica. El concepto convencional en cuanto a la corriente supone por lo general, un flujo desde un potencial positivo (+) a un potencial negativo (-). Concepción que puede llevar a una cierta confusión, ya que la representación convencional del flujo de la corriente eléctrica es precisamente en la dirección opuesta al flujo de los electrones, como se indica en la figura 1.5.

Conviene por tanto concluir y recordar los siguientes puntos:

- 1) La corriente eléctrica se ha caracterizado convencionalmente, como aquella que circula desde el polo positivo (+) al negativo (-) en un circuito eléctrico. Esto indica que en nuestro caso la corriente circulará del cátodo hacia el ánodo, a través del conductor metálico.
- 2) En el electrolito, el transporte de la corriente eléctrica tendrá lugar entonces del ánodo al cátodo.
- 3) Habrá un consumo y por tanto la consiguiente pérdida de metal, en aquellos lugares del ánodo en que la corriente abandone el electrodo (metal) para pasar al electrolito¹⁴.

¹¹ Seminario Vega, Oswaldo Víctor. *op. cit.*

¹² *Ibidem.*

¹³ Schnerch, David A. "Investigation of steel Reinforcement Corrosion Protection by Chemical Admixture in Repair Structural Concrete". En: The Department of Civil and Geological Engineering. Faculty of Engineering. The University of Manitoba. Canada April 1999. <en línea> <http://home.cc.umanitoba.ca/~umshner/corrosion>.

4) El metal que recibe corriente desde el electrolito circundante no es corroído, excepto ciertos materiales como el aluminio y el plomo; los cuales pueden corroerse si reciben excesiva cantidad de corriente¹⁵.

1.1.3 Características del terreno y morfología de la corrosión.

El terreno es un medio corrosivo sólido, de conductividad iónica, en el cual su aspecto y sus propiedades varían según el porcentaje de arena, arcilla y limo que se encuentre en su composición (junto a los antes mencionados también se puede encontrar cal y humus), más allá de otros eventuales fragmentos ásperos que se puedan encontrar en la composición. Cuando el terreno contiene un cierto porcentaje de arena, arcilla y limo, se forma una composición en la cual éste asume una estructura ligera y porosa, la cual es característica del terreno agrícola¹⁶.

Los factores de la corrosión que se relacionan con la naturaleza física del terreno son:

- Capacidad de absorción del agua para la capilaridad y la adsorción (importante en el caso de la arcilla).
- Permeabilidad para el oxígeno, que penetra en el terreno para una difusión gaseosa en los poros o para una difusión en el agua por impregnación o absorción.

En cuanto a los factores de la corrosión que se relacionan con la naturaleza química del terreno tenemos:

- La presencia de sales, principalmente sulfatos y cloruro de sodio, potasio, calcio, magnesio; esta presencia se debe dar en cantidades comprendidas entre 100 y 1500 ppm.
- La presencia de bicarbonato de calcio en un grado tal que deposite capas de carbonato de calcio en el metal.
- El pH, normalmente cerca a la neutralidad corresponde a valores entre 6 y 7.5 en el extracto acuoso, con valores extremos de 3 para el terreno ácido y de 9.5 para el terreno alcalino.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la temperatura que abarca entre -50 y 50°C, su importancia es decisiva pues en el ártico la tierra se divide en zonas heladas. En estas zonas, la tierra pierde su agresividad cuanto se está a más profundidad con lo que deja de lado sus características de conductor iónico.

El terreno es un medio heterogéneo, cuya característica principal de retención de agua y de permeabilidad al oxígeno pueden variar por un lado, sobre un tramo horizontal debido a la presencia de diversos medios geológicos o, por otro lado sobre una línea

¹⁴ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre*”. 1986, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 9. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_7.html.

¹⁵ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 16.

¹⁶ Bianchi, Giuseppe; Mazza, Francesco. “*Corrosione e Protezione dei Metalli*”. Italia: Masson S.p.A-Milano, 3ra. ed., 1989. 285 p.

vertical (tuberías de extracción de petróleo, gas, etc), consecuencia del paso a través de capas de diferente naturaleza y permeabilidad al oxígeno¹⁷. Más adelante en el apartado 1.1.6.2 se hablará extensamente de éste tema.

1.1.4 Influencia de la resistividad del terreno.

Entre los parámetros de los cuales depende la velocidad de corrosión del acero en la tierra, el más representativo es la resistividad eléctrica (expresada en Ω -cm) que engloba a la humedad y a la salinidad del terreno.

En base a la resistividad, que viene estimada en una etapa previa, se determina cual es el nivel de agresividad del terreno, para posteriormente definir la medida de protección de las tuberías. La tabla 1.2 resume la clasificación correctamente adoptada¹⁸.

Tabla 1.2. Clasificación de la agresividad del terreno en base a la resistividad¹⁹.

Resistividad Ω cm.	<i>Hasta 500</i>	<i>De 500 a 1000</i>	<i>De 1000 a 2000</i>	<i>De 2000 a 10000</i>	<i>De 10000 a 50000 (arena y grava)</i>	<i>Mas allá de 50000 (acantilado)</i>
Agresividad del terreno	<i>Muy alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Media alta</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>	<i>Ausente</i>

1.1.5 Medida del potencial de estructuras enterradas y sumergidas.

Uno de los métodos que se practica para determinar si una estructura metálica enterrada y/o sumergida está o no en condiciones de corroerse, es mediante la medida del potencial eléctrico del metal, respecto al electrolito.

Por ejemplo, para el hierro en contacto con el terreno, el potencial de equilibrio es de $E_{revFe^{++}} = -0.5$ V. Si el potencial de la estructura enterrada es mayor de -0.5, significa que la estructura resulta polarizada anódicamente y favorece a la corrosión, mientras que si es menor de -0.5 V resulta polarizada catódicamente y favorece su protección. La medición viene seguida de la medida de la diferencia de potencial del semielemento **Fe/terreno** con el auxilio de un electrodo de requerimiento **Cu/CuSO₄** (electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado) $E_{Cu/CuSO_4 sat} = 0.35$ V. Si el valor neto durante la medida ($E = E_{Cu} - E_{Fe}$) supera 0.85 V significa que la estructura enterrada está protegida; por consiguiente si el valor es inferior a 0.85 V, la estructura está en condiciones de corroerse²⁰.

*En el caso que $E_{revFe^{++}}$ sea mayor a -0.5 habrá corrosión, entonces:

$$-0.4 > -0.5$$

$0.35 - (-0.4) = 0.75$como 0.75 es menor a 0.85, se reafirma que habrá corrosión.

¹⁷ Bianchi, Giuseppe; Mazza, Francesco. 3ra. ed. *op. cit.*, pp. 286.

¹⁸ Para una mejor orientación se recuerda que 10000 Ω cm corresponde a la resistividad del agua potable, esto resulta aproximadamente 100 veces menor que la del agua destilada y aproximadamente 400 veces mayor que la del agua de mar.

¹⁹ *Ibíd.*, p. 290.

²⁰ Bianchi, Giuseppe; Mazza, Francesco. "Corrosione e Protezione dei Metalli". 1ra. ed., Italia: Masson S.p.A-Milano, 1980. 258-259 p.

*En el caso que $E_{revFe^{++}}$ sea menor a -0.5 habrá protección, entonces:
 $-0.6 < -0.5$

$0.35 - (-0.6) = 0.95$como 0.95 es mayor a 0.85 , se reafirma que habrá protección.

Los distintos escenarios (electrolito de diferente composición y diferentes metales), darán como resultado distintos potenciales de equilibrio.

Cuando se trata de medir el potencial de una tubería enterrada, se toma como referencia el electrodo de $Cu/CuSO_4$ (saturado) y un milivoltímetro de resistencia interna elevada (mayor de $100\ 000$ ohms)²¹. Uno de los polos del milivoltímetro, el positivo, se une al electrodo de referencia y el negativo a la tubería. El valor que marque el aparato será el potencial de disolución del metal del tubo, respecto al medio agresivo, ya sea el suelo o el agua. La disposición tanto de la tubería, el milivoltímetro y el electrodo de referencia, así como también la forma de realizar esta medida se representa de manera simple en la figura 1.6. El electrodo debe situarse justo encima de la generatriz superior de la tubería, de forma que quede perpendicular a ella.

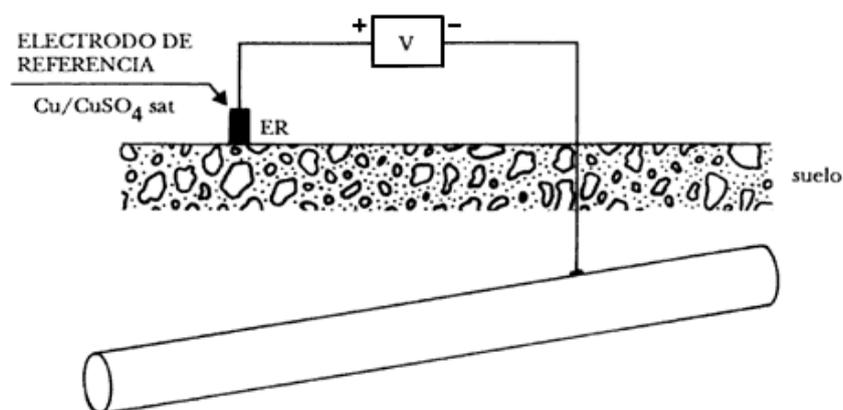


Figura 1.6. Realización práctica de la medida de potencial de una tubería, utilizando un electrodo de referencia de $Cu/CuSO_4$ saturado²².

Se sabe también, que las medidas de potencial pueden verse afectadas por la caída óhmica producida por el paso de la corriente eléctrica externa, generada en el proceso de la protección catódica. Esta caída de voltaje puede ser desde unos milivoltios a uno o varios centenares, según sea el proceso. La magnitud del error depende de:

- La forma de la estructura a proteger,
- La corriente que fluye entre ella y los ánodos,
- La resistividad del medio
- La distancia entre el electrodo de referencia y la estructura. Si la distancia y la corriente son pequeñas, la caída de potencial puede ser despreciable.

²¹ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión*”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_9.htm

²² Ibidem.

La corriente que llega a la estructura que desea protegerse, crea un campo eléctrico de líneas equipotenciales a su alrededor como apreciamos en la Figura 1.7. Según esta figura, cualquier punto de la superficie del suelo elegida para colocar el electrodo de referencia, tendrá un potencial diferente al inmediatamente próximo. Cada uno de estos puntos tendrá a su vez una caída de potencial que dependerá de la resistencia eléctrica del terreno entre el electrodo y la tubería. El electrodo de referencia deberá colocarse justamente encima de la generatriz superior del tubo.

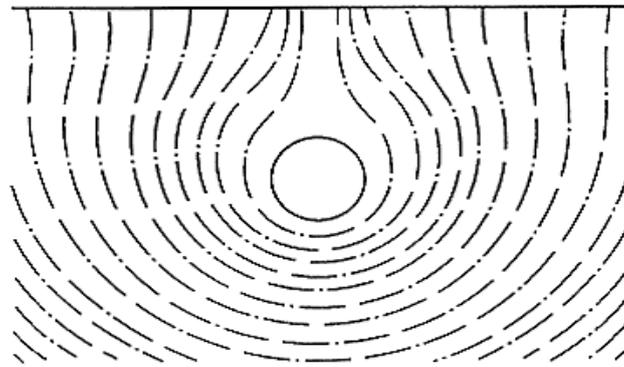


Figura 1.7. Campo eléctrico alrededor de una tubería.

Para asegurar una medida correcta del potencial, estas líneas equipotenciales deben ser perpendiculares a la superficie del suelo. Esto se consigue cuando la distancia entre la estructura enterrada y el ánodo es muy grande, en comparación con la profundidad a la que dicha estructura está enterrada (Figura 1.8 a). Si la separación es pequeña, las líneas equipotenciales sufren una distorsión, por lo que dejan de ser perpendiculares a la superficie del suelo y, por tanto, afectan mucho las medidas (Figura 1.8 b).

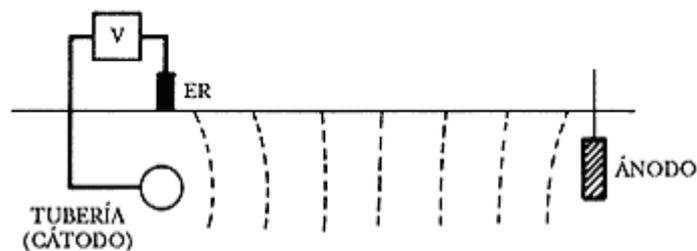


Figura 1.8 (a). En este caso la medida de potencial no es afectada por el campo eléctrico.

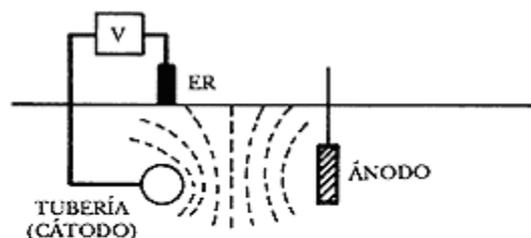


Figura 1.8 (b). En éste caso la medida de potencial es afectada por el campo eléctrico.

Según la bibliografía especializada, el electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO_4 saturado), es prácticamente el único que se utiliza para la medición del potencial de estructuras enterradas. En el caso de estructuras sumergidas se puede

utilizar además del antes mencionado, el electrodo de plata/cloruro de plata (**Ag/AgCl**) en agua de mar (se menciona aunque no es el caso de estudio), evitando así el problema de contaminación en la solución del electrodo. El electrodo de calomel saturado (no es muy usado por su fragilidad) y para aquellos casos en estructuras sumergidas, en que se requiera que los electrodos funcionen por lapsos largos en una posición fija, se prefiere utilizar el **Zn** de alta pureza como electrodo

La medida del potencial, es esencial para la evaluación de la eficacia del método de protección (revestimientos, protección catódica, etc.), pero es aún más porque, indica cuan grande es la superficie anódica y catódica del macroelemento galvánico que determina el proceso de corrosión. En particular, resulta de notable eficacia para la localización y el control del área anódica que provoca corriente dispersa; fácilmente localizable a causa de los altos valores de polarización anódica, creando en la estructura el paso de corriente a alta densidad²³.

1.1.6 Causas de corrosión en tuberías enterradas y sumergidas.

Ya se ha visto que en líneas de tuberías enterradas y/o sumergidas en un electrolito, los procesos de corrosión son electroquímicos. Esta destrucción electroquímica del metal, se debe entre otras causas a lo siguiente:

- 1) Heterogeneidad del metal.
- 2) Heterogeneidad del electrolito.
- 3) Acción de las corrientes erráticas o vagabundas.

1.1.6.1 Heterogeneidad del metal.

a) Pares galvánicos:

La heterogeneidad más evidente, es la que resulta de la unión de dos metales de naturaleza diferente sumergidos en un mismo electrolito. Por ejemplo, si dentro de un mismo electrolito vinculamos eléctricamente cobre y hierro, se establecerá una corriente eléctrica que saldrá del hierro hacia el electrolito. En tal caso es el hierro el que se corroe.

La zona donde la corriente sale del metal hacia el electrolito se denomina anódica. La zona donde la corriente ingresa hacia la estructura se denomina catódica. En la primera, habrá disolución del metal con el paso a la forma de iones positivos, correspondiendo una oxidación (corrosión). En la segunda habrá una ganancia de electrones, correspondiendo a una zona de reducción de especies iónicas²⁴.

Si llamamos E_{Cu} y E_{Fe} a los potenciales espontáneos a circuito abierto del cobre y del hierro sumergidos en el electrolito, éstos tenderán a tomar un potencial de equilibrio, cuando se vinculen eléctricamente ambas estructuras. El potencial de equilibrio se denomina potencial de corrosión, E_{corr} y a él corresponderá la corriente de corrosión I_{corr} . En consecuencia, como el cobre es más noble que el hierro, éste último se corroe y el tipo de corrosión se denomina por acoplamiento o par galvánico.

²³ Bianchi, Giuseppe; Mazza, Francesco. 1ra ed. *op. cit.*, p. 259.

²⁴ Cfr. *supra* Cap. Primero, 1.1.2

b) Superficies disímiles:

Cuando se asocian viejas estructuras oxidadas de un metal con otras nuevas del mismo metal, o cuando la superficie del metal no presenta superficialmente las mismas condiciones, se crearán zonas anódicas y catódicas. Esto frecuentemente es observado cuando se trata de reemplazar una sección de tubería, el metal oxidado es siempre más noble que el metal nuevo y en tal caso, se corroerá este último. El metal nuevo puede fallar más rápidamente que lo esperado. La explicación se halla en la aplicación de la serie práctica galvánica, donde se muestra que el potencial del nuevo acero es muy diferente respecto al viejo acero corroído.

Asimismo, si durante el trabajo en un sistema de tuberías por acción mecánica de impactos con herramienta o instrumentos de corte, se dejan al descubierto áreas de acero resplandeciente, éstas pueden convertirse en ánodos; y esto puede resultar en una corrosión severa en un suelo de baja resistividad.

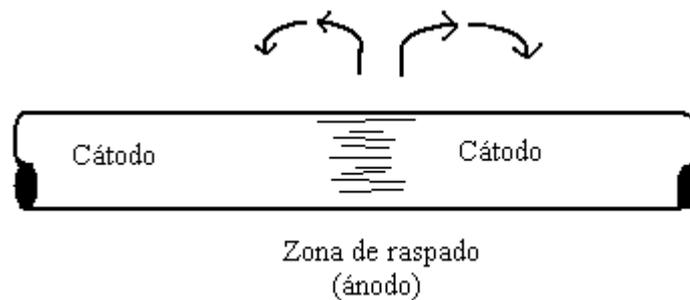


Figura 1.9. Tubería de acero con una zona de raspado que constituirá la zona anódica en la superficie metálica.

Asimismo, las diferencias internas de tensiones mecánicas, de composición, o de orientación cristalina también pueden originar corrosión por la creación de diferentes zonas anódicas y catódicas en las superficies involucradas.



Figura 1.10. Corrosión debida a superficies disímiles.

c) Unión de metales disímiles:

Si en la construcción de una tubería intervienen metales disímiles, unidos eléctricamente y enterrados y/o sumergidos en agua, se crea un potencial eléctrico entre ellos, produciéndose por lo tanto la corrosión.

La magnitud del potencial del metal y la determinación de cuál de ellos es el ánodo, dependen de la posición de éstos en la serie galvánica. El potencial natural que asume un metal con respecto a un electrolito es característico, y lo ubica en una posición dentro de la serie galvánica. Este potencial normalmente es medido con respecto a una celda de referencia, como es el electrodo de cobre/sulfato de cobre.

Naturalmente, estos potenciales pueden variar en electrolitos de diferente composición²⁵, pero la posición relativa del potencial de los metales se mantiene. El metal con mayor tendencia a corroerse, será aquel que tenga el menor potencial en la serie galvánica²⁶.

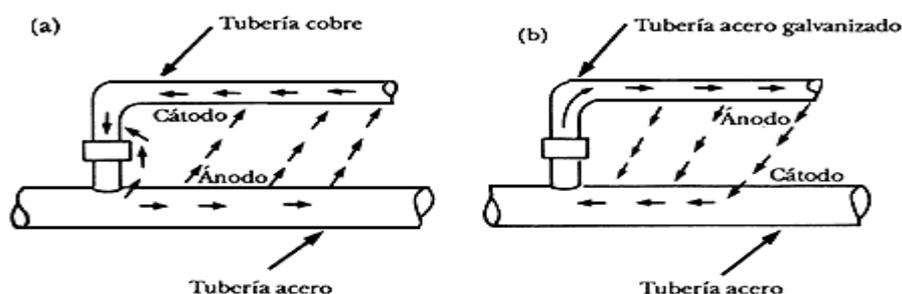


Figura 1.11(a) Corrosión de una conducción principal de acero por la conexión de una derivación de cobre. (b) Disolución del zinc de una tubería de acero galvanizado, que ha sido conectada a una conducción principal de acero²⁷.

1.1.6.2 Heterogeneidad del electrolito.

a) Variación en la composición del electrolito

Una de las causas de corrosión en tuberías enterradas, es la diferencia de composición del electrolito que origina potenciales diferentes a lo largo de la tubería enterrada, estableciendo las condiciones necesarias para que se produzcan celdas de corrosión.

En la figura 1.12 se muestra una tubería que atraviesa, dos tipos de terreno. Como se puede ver, el potencial de la tubería en el electrolito representado por **A**, es ligeramente diferente del mismo metal en el electrolito representado por **B**, originando un proceso corrosivo²⁸.

²⁵ Cfr. *supra* Cap. Primero, 1.1.5

²⁶ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 20.

²⁷ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión". 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.html

²⁸ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 16.

Consideremos ahora que el metal de una estructura es perfectamente homogéneo y que ella, por estar enterrada y tener una extensa longitud, atraviese suelos de naturaleza diferente, como por ejemplo suelos arenosos extremadamente secos y terrenos arcillosos muy húmedos. En esta última zona, la estructura se corroerá como consecuencia de la circulación de corrientes a través del electrolito desde las zonas anódicas (suelos arcillosos) a las zonas catódicas (suelos arenosos). El proceso podrá acelerarse por la diferente concentración de oxígeno²⁹.

Como se decía, el suelo generalmente es un medio heterogéneo, en donde se dan muchas variaciones en la velocidad de corrosión de los metales. Un suelo natural contiene elementos como arena, arcilla, cal y humus. Estos componentes pueden estar mezclados en el suelo en diferentes proporciones que darán lugar a distintos grados de agresividad³⁰.

Por lo general los suelos arenosos, margo-arenosos, margo-calcáreos y calcáreos no son agresivos; no obstante los suelos arcillosos en algunas condiciones suelen ser agresivos. Los que son agresivos por naturaleza, son las turbas, los humus libres de cal y también los suelos cenagosos y de aluvión.

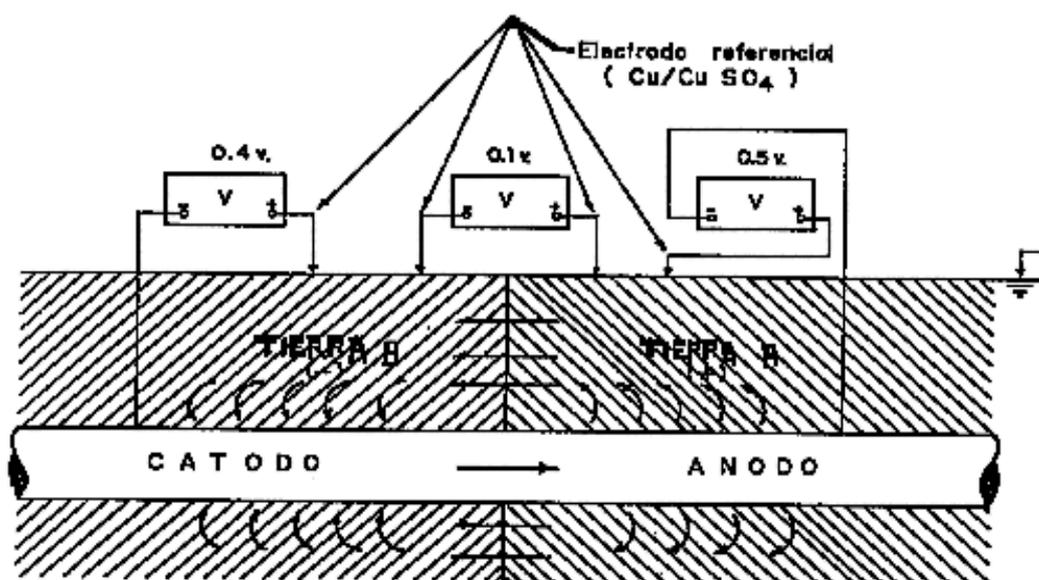


Figura 1.12 Corrosión debida a variación en la composición del electrolito³¹.

Los suelos artificiales, que están formados por escorias y basuras, elementos en putrefacción, residuos humanos e industriales, también son agresivos³².

²⁹ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión". 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.html

³⁰ Cfr. *supra* Cap. Primero, 1.1.3.

³¹ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 17.

³² Cfr. *supra* Cap. Primero, 1.1.6.2. C

b) Aireación diferencial

La diferente aireación es una de las fuentes causales de corrosión más importante³³. En un electrolito que se puede suponer homogéneo, frecuentemente existen diferencias en la concentración de aire (oxígeno) disuelto. Esta es una causa de corrosión puesta en evidencia por *Evans*, llamada aireación diferencial o efecto *Evans* ya que fue uno de los investigadores que más han contribuido al conocimiento de la corrosión³⁴.

Cuando un sector de la tubería recibe oxígeno, a diferencia de otra parte adyacente donde es mínima, se forma una celda de corrosión³⁵, donde la zona de la tubería aireada tomará un potencial más positivo y por tanto funcionará como cátodo, y la zona no aireada tomará un potencial menos positivo y por tanto actuará como ánodo. Esta última se corroerá por aireación diferencial.

Por ejemplo, si la tubería cruza una pista pavimentada, la tierra sobre cada lado de la pista permite un libre acceso del oxígeno a la superficie de la tubería, que se comportará como cátodo. En cambio, el pavimento evita el libre acceso del oxígeno a la tubería, por lo que la tubería debajo de la pista se comportará como ánodo y será corroída, como se demuestra en la figura 1.13³⁶.

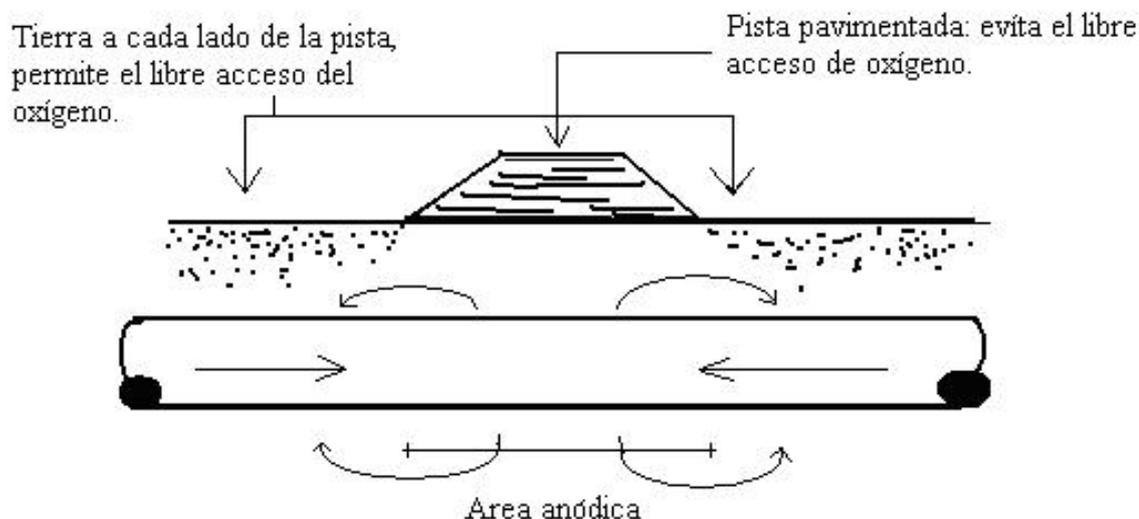


Figura 1.13. Corrosión por aireación diferencial. Corrosión de una tubería que se encuentra por debajo de una pista pavimentada y tierra a cada lado de la pista.

³³ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 17.

³⁴ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión*”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.html

³⁵ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 17.

³⁶ *Ibidem*.

Si una tubería metálica se encuentra en un terreno donde exista una concentración diferente de oxígeno, la parte menos oxigenada será la zona anódica y por tanto será la que sufrirá los efectos de la corrosión.

Este fenómeno se verá agravado si la tubería, a partir de una cierta longitud, atraviesa terrenos de naturaleza diferente, ya que puede ser muy distinta la permeabilidad al aire en cada uno de sus componentes y por tanto mayores sus diferencias en la concentración de oxígeno (Figura 1.14)³⁷, aparte de que se originan potenciales diferentes como se vio en el apartado anterior.

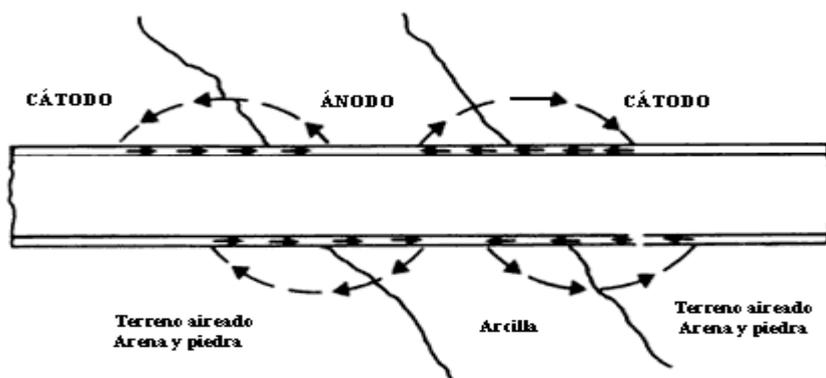


Figura 1.14. Corrosión por aireación diferencial. Corrosión de una tubería que atraviesa terrenos de naturaleza diferencial.

c) Corrosión química o bacteriana:

En los últimos años se ha puesto en evidencia el rol importante que pueden tener ciertas bacterias en la corrosión de los metales, en especial las bacterias reductoras de sulfatos. Los productos de la corrosión más característicos son el sulfuro y el óxido de hierro. Los microorganismos que se asocian a la corrosión son de dos tipos: aeróbicos y anaeróbicos. Uno de los casos más estudiados es el del hierro enterrado dentro de un medio anaerobio.

La presencia de microorganismos es uno de los factores que provoca la despolarización, de modo que el efecto electrolítico no llega a frenarse, y por tanto, la corrosión e incrustación de la tubería se acelera. La despolarización, de origen biológico, se lleva a cabo por ferrobacterias que obtienen energía por la oxidación del hierro (en el ánodo) y por bacterias sulfato-reductoras que movilizan el H^+ (en el cátodo).

Si el oxígeno atmosférico no puede penetrar el suelo, se da el caso donde en suelos arcillosos o turbosos, el hidrógeno producido a consecuencia de la reacción catódica en la estructura enterrada, puede llegar a ser eliminado (oxidado) por una acción microbiana³⁸. En suelos ligeramente ácidos a alcalinos (pH de 6 a 9) los sulfatos son reducidos por estas bacterias, para formar sulfato de calcio y sulfuro de hidrógeno. Cuando estos compuestos entran en contacto con las tuberías de hierro enterradas, se produce una conversión del hierro a sulfuro de hierro. Puesto que estas bacterias se reproducen en estas condiciones, seguirán fomentando esta reacción hasta que se

³⁷ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión*”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.html

³⁸ *Ibidem*.

produzca una falla de la tubería. Este proceso es el resultado de la actividad metabólica de un microorganismo (la bacteria *Sporovibrio desulfuricans*), que se desarrolla en ausencia completa de oxígeno libre (condiciones anaerobias).

Decimos entonces, que para oxidar el hidrógeno de estos medios nutritivos orgánicos, esta bacteria no utiliza el oxígeno libre, sino el ion sulfato (SO_4^{2-}), reduciéndolo a sulfuro (S^{2-})³⁹.

1.1.6.3 Efectos de corrientes erráticas o vagabundas.

Por corrientes vagabundas se designan generalmente a las corrientes eléctricas, que circulan en el suelo provenientes de los sistemas eléctricos de tracción (tranvías, ferrocarriles), siendo las más dañinas las provenientes de ferrovías electrificadas con corriente continua, de las instalaciones eléctricas industriales (como las plantas de refinado electrolítico, de galvanoplastia, de soldadura), y de los sistemas de alimentación de energía (de corriente continua o alterna).

La existencia de estas corrientes, es independiente de cualquier disimilitud de materiales metálicos, de suelos o de aguas, son muy variables en su intensidad, dirección y sentido, llamándose las por tal razón vagabundas. Para comprender el proceso de corrosión por corrientes vagabundas, utilizaremos el ejemplo de un sistema de tracción eléctrico cuyo recorrido es paralelo o aproximadamente paralelo a una canalización enterrada, tal y como se ha graficado en la figura 1.15.

Como se sabe, el retorno de las corrientes utilizadas por los sistemas de tracción eléctricos, se efectúa por los rieles. Generalmente, la continuidad eléctrica de los mismos no es perfecta, como tampoco su aislamiento respecto al suelo. Debido a ello, una parte de las corrientes pasan de los rieles al suelo y de éste a la canalización vecina, circulando hasta la subestación; allí salen de la canalización.

Las corrientes son localmente peligrosas, en las zonas donde abandonan las estructuras para retornar a través del suelo, hacia el polo negativo de las fuentes de energía que las engendran. En tales zonas, denominadas anódicas, se origina la corrosión electrolítica que será más o menos intensa según agentes como la potencia del sistema de tracción, la frecuencia del servicio, las aceleraciones y desaceleraciones, la continuidad eléctrica de los rieles, el aislamiento del balasto (es decir, piedras que inmovilizan los durmientes), la humedad del suelo y las sales que contenga.

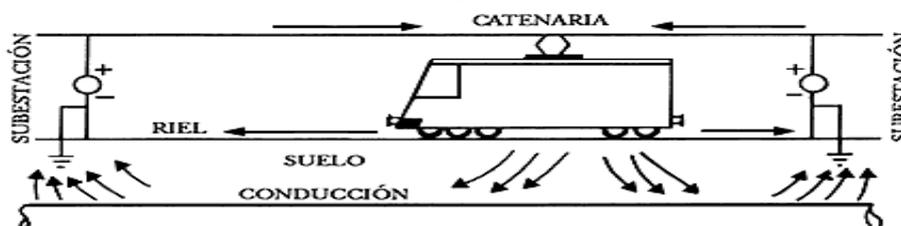


Figura 1.15. Mecanismo de corrosión de una tubería por efecto de las corrientes vagabundas que provienen de un sistema de tracción eléctrica.

³⁹ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_10.html

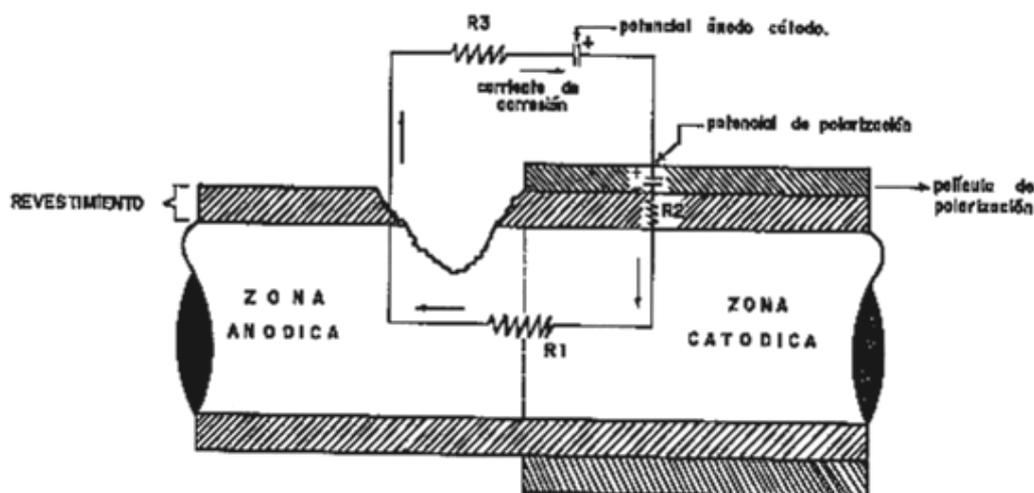
En cambio, las zonas de entrada de las corrientes, llamadas catódicas, no presentan localmente inconvenientes y por el contrario, son beneficiosas a la canalización.

1.1.7 Factores que influyen en la corriente de corrosión.

Sobre la corriente de corrosión hay una serie de factores que influyen, entre los cuales mencionaremos:

- Resistencia de la conexión metálica entre el ánodo y el cátodo: Para tuberías, ésta resistencia es pequeña ya que pasa a través de una relativa sección corta de la tubería misma.
- Resistencia en el medio electrolítico: Es función de la resistividad del electrolito.
- Resistencia del revestimiento: Un revestimiento de buena calidad interpondrá una alta resistencia dentro del circuito ánodo-cátodo.
- La polarización: Se puede tomar como una capa aislante que origina un potencial de polarización, opuesto al potencial de la celda de corrosión que causa el flujo de corriente.

Mientras mayores sean estos factores, la corriente de corrosión será menor. La figura 1.16 nos muestra una representación esquemática de estos factores.



*R1: Resistencia del circuito metálico.
R2: Resistencia del revestimiento.
R3: Resistencia del medio electrolítico.*

Figura 1.16. Representación esquemática de un circuito metálico de una tubería, donde se muestran los factores que influyen en la corriente en la corrosión⁴⁰.

⁴⁰ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 23.

1.1.8 Relación de proporción entre las áreas anódicas y catódicas.

La relación entre las áreas anódicas y catódicas influye notablemente en la velocidad de corrosión.

Un área anódica pequeña en contacto con un área catódica grande, en un medio de baja resistividad, probablemente tenga una corrosión rápida y seria. En éste caso el ánodo estará sujeto a una alta densidad de corriente de descarga por unidad de área; por lo contrario en el cátodo se tendrá una densidad de corriente relativamente baja. Cuando sucede esto, no habrá suficiente corriente para producir la polarización la cual hubiera tendido a limitar el flujo de corriente. Por ejemplo, si una tubería revestida presenta pequeños defectos en el recubrimiento, se desarrollan *pits* de corrosión muy rápidamente.

Lo contrario ocurre con un área anódica grande, como por ejemplo una tubería de acero, y un área catódica pequeña, como es el caso de una válvula de bronce. La corriente de corrosión puede ser descargada desde el acero, pero la densidad de corriente por unidad de área puede ser relativamente pequeña, y el metal se consume lentamente. En el cátodo puede haber inicialmente una alta densidad de corriente por unidad de área, la cual puede ser suficiente para polarizar el área catódica, reduciendo el flujo de corriente a una cantidad que no cause una seria corrosión.

“Por tanto, si el área anódica es pequeña con respecto al área del cátodo, la corrosión puede ser rápida e intensa. En cambio, en otros casos, si el área anódica es grande comparada con el área catódica, la corrosión puede ser relativamente lenta y suave”⁴¹.

Por último, se ha confirmado el hecho de que si el hierro está conservado en un ambiente en el cual la humedad relativa se mantiene debajo del límite seguro, equivalente a un valor del 40%, no se verifica por tanto ningún fenómeno de corrosión electroquímica. Esto es válido en el caso del acero desnudo, expuesto a la corrosión atmosférica.

⁴¹ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. *op. cit.*, pp. 25.

Capítulo II

Recubrimientos de protección anticorrosiva.

2.1 Recubrimientos protectores.

2.1.1 Fundamentos y generalidades de los recubrimientos protectores.

Si la corrosión como acabamos de ver en el capítulo anterior, es producida por la acción combinada de la humedad y el oxígeno atmosféricos, al actuar sobre la pila electroquímica formada sobre la superficie del metal (en tuberías ya sea enterradas o sumergidas), un procedimiento que la evitaría, podría ser la formación de una barrera impermeable en contacto con el acero. Al no existir reacción química, no habría lugar a la oxidación¹.

La aplicación de pinturas o recubrimientos protectores, en virtud de su versatilidad y eficiencia, ha logrado una buena aceptación como medio de control de la corrosión. Estos recubrimientos tienen a su cargo la protección de la mayor parte de las superficies de metal, madera o concreto en casi todas las plantas.

¹ Suárez; J., M. “*Consideraciones sobre pintura*”. 1999. <en línea>
<http://www.jmsuarez.com/cpintura.html>

En términos generales, un recubrimiento anticorrosivo se define como una mezcla o dispersión relativamente estable de un pigmento en una solución de resinas y aditivos. Estos recubrimientos, son materiales aislantes eléctricos, cuya composición o formulación (el producto es presentado de forma líquida o pastosa) debe ser tal que al ser aplicada en capas, siguiendo el procedimiento adecuado, sobre un substrato metálico; sea capaz de transformarse por un proceso de curado, en una película seca, uniforme, plástica, que actúe como una barrera flexible, adherente que la proteja y/o decore y debe tener máxima eficiencia de protección contra la corrosión. La durabilidad de la película, depende fundamentalmente de su resistencia al medio corrosivo y de la facultad de permanecer adherida al substrato metálico. La eficiencia de protección contra la corrosión, además de considerar los factores anteriores, depende de la habilidad de la película de recubrimiento y de su espesor, para impedir el acceso de los agentes corrosivos al substrato metálico.

Debemos aclarar que, debido a la diversidad de medios en los que puede encontrarse la superficie metálica a proteger, no existe una pintura universal. La resistencia a la degradación de una película de pintura, como ya se mencionó, está determinada por su composición y la acción destructiva del medio en que se encuentra, por lo que éste deberá ser estudiado con detalle, antes de proceder a la elección del sistema más adecuado. En esta tesis, sólo trataremos el caso de las tuberías enterradas y/o sumergidas.

Un factor importantísimo para la buena capacidad protectora de un recubrimiento, es el espesor de capa depositada. Cuanto mayor sea el espesor de la capa, la humedad y el oxígeno encontrarán más dificultades para su penetración, y con ello disminuirá el peligro de corrosión. La película de pintura (recubrimiento) es siempre permeable en mayor o menor grado, según la composición de su ligante, concentración y naturaleza del pigmento. Por ello debe buscarse el equilibrio idóneo entre calidad de pintura y espesor de capa depositada a fin de obtener un buen balance entre protección y precio del sistema.

Un buen recubrimiento protector para instalaciones metálicas enterradas o sumergidas, debe tener las siguientes características principales:

- a) Perfecta adherencia a la superficie metálica, tanto en el momento de la aplicación como durante toda la vida de la instalación.
- b) Fácil aplicación. Su método de aplicación no debe afectar las propiedades de la tubería.
- c) Poder dieléctrico elevado.
- d) Elasticidad para absorber las dilataciones del metal base, sin fisurarse.
- e) Ser compactos y no poroso.
- f) Dureza para evitar su rotura (que puede dejar la superficie metálica al descubierto).
- g) Inalterabilidad frente a los agentes químicos.

- h)** No debe ser tóxico.
- i)** Inerte ante hongos y bacterias.
- j)** No absorber la humedad.
- k)** Deberá de conservar sus propiedades físicas a través del tiempo.
- l)** Resistente al desprendimiento catódico.
- m)** Resistente a efectos térmicos, al impacto y a la fricción.
- n)** Resistente al manejo, almacenaje e instalación de las estructuras. En el caso de tuberías, el daño de los recubrimientos durante el transporte y construcción, son casi inevitables.
- o)** Resistente a las acciones mecánicas del suelo.
- p)** Ductilidad.

Para seleccionar el recubrimiento apropiado ya sea en el caso de tuberías enterradas y/o sumergidas, como en otro tipo de medio; es importante tener que considerar los siguientes factores:

- a)** El medio en el que va a estar alojado el ducto.
- b)** Accesibilidad al ducto.
- c)** Temperatura a la que va a operar el ducto.
- d)** Temperatura ambiente durante la aplicación, almacenaje, construcción, instalación y prueba hidrostática.
- e)** Localización geográfica.
- f)** Compatibilidad con el tipo de recubrimiento de los ductos existentes.
- g)** Manejo, almacenaje y método o técnica de instalación de la tubería.

El tubo que será recubierto deberá protegerse interna y externamente de la corrosión atmosférica, evitando causar daños al recubrimiento que se aplica. Se debe tener especial cuidado de no dañar el recubrimiento al estibar el tubo, por lo que se usarán separadores con apoyos adecuados o soportes con almohadillas. Se usarán bandas de lona reforzada para manejo y movimientos de los tubos, así como para bajar el ducto en la zanja o colocarlo en el hoyo.

- h)** Requerimientos de preparación de la superficie del tubo.
- i)** Costos.

Para efectos de protección anticorrosiva y debido a la permeabilidad natural de los recubrimientos, éstos deberán aplicarse a un espesor tal que la película seca nunca sea inferior a los 6 mils² (0.1524 mm). En un principio, podría pensarse en cubrir este espesor en una sola formulación de un recubrimiento, que incluyese la resina adecuada y un porcentaje determinado de pigmentos inhibidores; no obstante, la eficiencia en la protección contra la corrosión, no depende exclusivamente de la resina y del pigmento, sino también del espesor. Esta serie de factores incluyendo como parte muy importante aspectos de tipo económico, han dado lugar a la utilización de diferentes formulaciones para cubrir el espesor antes mencionado. Dependiendo de su posición, estas formulaciones se denominan primario, enlace y acabado; al conjunto se le conoce como sistema, las características más relevantes de cada uno de ellos, se mencionan a continuación:

a) Primario

Son recubrimientos cuya formulación está encaminada fundamentalmente hacia la obtención de una buena adherencia con el sustrato metálico, así como la de inhibir la corrosión, por lo que normalmente los contenidos de los pigmentos inhibidos son elevados (contenido de pigmento en volumen - PVC, inferior a 35%). Otros requisitos adicionales en un primario, es conformar una superficie lo suficientemente áspera y compatible, para que las siguientes capas de enlace o acabado logren una buena adherencia; además, deben ser resistentes a los productos de la corrosión, y poseer una buena humectación. Los primarios pueden elaborarse a partir de cualquiera de las resinas que mencionaremos en el apartado (2.1.3).

b) Acabados

Los acabados, representan la capa exterior en contacto con el medio ambiente y se formulan para promover la impermeabilidad del sistema, por lo que normalmente su contenido de pigmento en volumen (PVC) es inferior al 25%. En este tipo de recubrimientos es frecuente el uso de entonadores y el contenido de pigmentos inhibidores es inferior al de un primario. Su grado de molienda es tal que su superficie ofrece un aspecto terso y/o brillante. En la elección del tipo de acabado, es de capital importancia para la adherencia, su compatibilidad con el tipo primario utilizado; en términos generales, el uso del mismo tipo de resina en estos dos componentes del sistema asegura una buena adherencia, aún cuando hay casos como los epóxicos, capaces de lograr una adherencia sino excelente, cuando menos aceptable sobre otro tipo de recubrimientos.

c) Enlace

Para ciertos casos particulares no es posible tener el mismo tipo de resina en el primario y en el acabado, presentándose problemas de incompatibilidad o de adherencia, por lo que se requiere de una capa intermedia denominada enlace, capaz de adherirse tanto al primario como al acabado. Normalmente, los enlaces contienen una mezcla de resinas, parte de las cuales promueven la adherencia con el primario y el resto con el acabado. Generalmente los pigmentos inhibidores están ausentes. Con fines de identificación y control de espesores, es conveniente que el primario, enlace y acabado en un sistema,

² <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

sean de diferente color y como se mencionó anteriormente, la suma total de los espesores de estos componentes debe ser superior a los 6 mils (0.1524 mm), a fin de que sea efectivo en su protección contra la corrosión.

2.1.2 Mecanismos generales de protección de las películas de recubrimientos.

Considerando la variedad de recubrimientos anticorrosivos que hay disponibles en el mercado, es posible señalar tres mecanismos generales de protección anticorrosiva:

a) Como barrera impermeable:

Dado que las moléculas de resina se unen o enlazan en tres direcciones ocluyendo al pigmento, esto da como consecuencia la formación de una barrera que en mayor o menor grado, dependiendo de la calidad del recubrimiento, impide la difusión de los agentes de la corrosión al sustrato³.

b) Pasivación:

El depósito de recubrimiento sobre el sustrato metálico, inhibe los procesos anódicos y catódicos de la corrosión, incluso actúa como un material dieléctrico (alta resistencia eléctrica), que impide el flujo de electrones⁴.

c) Protección catódica:

Cierto tipo de recubrimientos con alto contenido de *zinc* como pigmento, actúan anódicamente al ser aplicados sobre el acero. En este caso el sustrato metálico, es sujeto a una protección catódica con el zinc como ánodo de sacrificio, y no por la formación de una película impermeable⁵. En el siguiente capítulo se tratará más ampliamente el mecanismo de protección catódica.

2.1.3 Componentes básicos de un recubrimiento.

Un recubrimiento considera los siguientes componentes básicos:

a) Pigmentos:

Son sustancias sólidas orgánicas o inorgánicas, que reducidas a un tamaño de partícula inferior a las 25 micras y dispersas en el vehículo, imparten a la película seca del recubrimiento, propiedades tales como: resistencia a la corrosión, resistencia mecánica, poder cubriente, así como protección a la resina de la acción degradante de los rayos UV del sol⁶. Su función consiste primordialmente en conferir color y opacidad a la capa de pintura o del recubrimiento. Son generalmente sustancias sólidas en forma de polvo de muy fina granulometría, que por un procedimiento adecuado de molturación, en presencia del ligante, se desagregan en partículas elementales para obtener el máximo rendimiento colorístico. Entre las características deseables en un pigmento, se pueden

³ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

⁴ *Ibidem.*

⁵ *Ibidem.*

⁶ *Ibidem.*

mencionar las siguientes: no reactividad química con el vehículo, fácil humectación y dispersión, alta resistencia al calor, la luz y a agentes químicos.

Podemos clasificarlos en:

1- Pigmentos cubrientes:

Son los más ampliamente utilizados. Confieren opacidad al film de pintura por el efecto combinado de su índice de refracción respecto al ligante, granulometría y fenómenos de reflexión y difracción de la luz que incide sobre la capa de pintura. El color depende de su naturaleza química. Los más utilizados son:

- *Blancos*: Bióxido de titanio, óxido de zinc.
- *Negros*: Negros de humo, óxidos de hierro.
- *Amarillos*: Óxidos de hierro, amarillos de cromo, amarillos azoe, amarillos de diarilida e isoindolinona, bismuto-vanadato.
- *Rojos*: Óxidos de hierro, rojos de molibdeno, rojos monoazoicos, rojos BON, quinacridónicos, DPP, perileno.
- *Verdes*: Óxidos de cromo, verdes de ftalocianina.
- *Azules*: Azul de Prusia, azul de ftalocianina, azul de indantreno.
- *Violetas*: Violeta de dioxacina, violeta de quinacridona.

2- Pigmentos anticorrosivos:

Utilizados en las imprimaciones o primeras capas en contacto directo con el acero, evitan o inhiben la corrosión mediante la pasivación anódica o catódica de la corriente electroquímica producida sobre la superficie metálica, o bien ejercen una protección catódica actuando como ánodo de sacrificio del hierro.

Entre los pasivantes destacan por su mayor utilización: Cromato de zinc, fosfatos de zinc modificados o no, tetraoxicromato de zinc, silicromato básico de plomo, cromato de estroncio, etc. La pasivación de la pila electroquímica se produce por la formación de compuestos férricos en el ánodo o por la creación de compuestos insolubles en el cátodo.

El zinc pertenece al grupo de los pigmentos anticorrosivos que se sacrifican por un carácter electroquímico menos noble que el hierro, destacando sobre cualquier otro pigmento metálico.

3- Pigmentos extendedores o cargas:

No poseen opacidad y apenas influyen en el color de las pinturas por su bajo índice de refracción.

Generalmente se utilizan en las imprimaciones y capas de fondo, para conseguir películas mates o satinadas, ejercer un papel de relleno en la estructura del film, a fin de obtener determinadas propiedades mecánicas por su granulometría y forma de partícula, o bien conseguir un óptimo empaquetamiento que mejore la protección anticorrosiva del sistema. En ocasiones, su empleo viene determinado por la necesidad de conseguir un costo razonable del producto, aunque esto en los esmaltes y pinturas de acabado, supone un detrimento de la calidad. Los más utilizados son:

- Barita y sulfato de bario.
- Carbonato cálcico.
- Talco.
- Mica.
- Caolín.
- Sílice y silicatos.
- Arenas de cuarzo.

4- Pigmentos especiales:

Algunos pigmentos utilizados en la industria de pinturas que no pueden clasificarse entre los anteriores por su especificidad, serían:

- Pigmentos metálicos: Como las pastas de aluminio utilizadas en los esmaltes metalizados, marteles, pinturas anticorrosivas, etc, óxido de hierro micáceo.
- Pigmentos nacarantes: Por su estructura cristalina, producen fenómenos de interferencia óptica similares al nácar, dando esmaltes de espectacular efecto al teñirlos con pigmentos colorantes transparentes: Mica recubierta con dióxido de Titanio.
- Pigmentos intumescentes: Utilizados en las pinturas del mismo nombre, tienen la propiedad de hinchar las películas de pintura bajo la acción de la llama, proporcionando una capa espumosa protectora del sustrato, como el Polifosfato amónico.
- Pigmentos tóxicos: Utilizados en las pinturas marinas para evitar la formación de colonias incrustantes en los cascos de los buques: Óxidos de cobre.

Los componentes de un recubrimiento deberán mezclarse íntimamente en un orden adecuado, para obtener finalmente el producto terminado. La optimización, en cuanto a su formulación, para un medio agresivo en particular, es el resultado de un intenso trabajo experimental de prueba y error, sin que exista un tipo de recubrimiento aplicable a todos los casos de corrosión.

b) Ligantes:

También llamado vehículo fijo, aglutinante o más vulgarmente *resina*. Son compuestos orgánicos o inorgánicos poliméricos, formadores de película; cuyas funciones principales son las de fijar el pigmento, promover buena adherencia sobre el sustrato metálico a los agentes corrosivos del medio ambiente. Es el componente básico del o capa anterior y en general promover la formación de una barrera flexible, durable e

impermeable recubrimiento al que confiere la posibilidad de formar película una vez curada, por el procedimiento específico de cada tipo. De él dependen las propiedades mecánicas y químicas de la pintura, y por tanto su capacidad protectora.

Técnicamente, son polímeros de peso molecular bajo o medio, que por acción del oxígeno del aire, de otro componente químico, del calor, etc. aumentan su grado de polimerización, hasta transformarse en sólidos más o menos plásticos e insolubles.

Aunque existen muchas clases, los más empleados son:

- Emulsiones diluibles en agua.
- Aceites vegetales o sintéticos.
- Barnices fenólicos modificados con aceites secantes.
- Resinas alquídicas o gliceroftálicas.
- Resinas amínicas de urea-formol y melamina-formol.
- Resinas de caucho clorado o ciclado, cloruro de vinilo, éter vinilisobutílico.
- Resinas vinílicas.
- Resinas acrílicas termoplásticas, termoestables, hidroxiladas.
- Resinas epoxídicas.
- Resinas de poliéster.
- Resinas poliuretánicas.
- Resinas de silicona y silicatos.
- Alquitranses y asfaltos.
- Resinas celulósicas.
- Resinas de fenol-formaldehído.
- Resina poliamídica.
- Resina de cumarona-indeno.
- Resina de sílice.
- Silicato de etilo, litio, sodio, potasio.
- Resina de hule clorado.

Cada tipo posee una determinada forma de secar y endurecer.

c) **Disolventes:**

También llamado vehículo volátil, éste básicamente permite la aplicación del recubrimiento por el procedimiento adecuado, confiriéndole una consistencia apropiada, ya que en general una pintura sin disolvente, sólo a base de pigmento y ligante tendría una viscosidad muy elevada. Debido a que son líquidos orgánicos de base alifática o aromática, tienen como función principal la de disolver las resinas y aditivos, y presentar un medio adecuado para la dispersión de pigmento. Estos compuestos no son formadores de película, ya que se eliminan del recubrimiento a través del proceso de secado; parte de las propiedades del recubrimiento tales como viscosidad, facilidad de aplicación y porosidad, dependen de la naturaleza del disolvente, por lo que para su elección deberán tomarse en cuenta propiedades tales como: poder de disolución, temperatura de ebullición, velocidad de evaporación, flamabilidad, toxicidad, estabilidad química y costo. Otra de sus cualidades es la de facilitar la fabricación del recubrimiento y mantener su estabilidad en el envase.

Normalmente, se emplean varios tipos de disolvente en una misma pintura, con el fin de regular el poder de dilución, facilidad de aplicación, velocidad de evaporación en la película, nivelación, etc.

Una primera clasificación a realizar sería en disolventes y diluyentes. Los primeros disuelven verdaderamente el ligante. Los diluyentes no tienen esta capacidad por sí solos y deben combinarse con los primeros.

De acuerdo con su naturaleza química, los más importantes son:

- Hidrocarburos alifáticos: Heptano, White Spirit.
- Hidrocarburos aromáticos: Tolueno, xileno, naftas.
- Alcoholes: Metanol, isopropílico, isobutanol, butanol.
- Ésteres: Acetato de metilo, etilo, isobutilo, butilo y amilo.
- Cetonas: Acetona, metiletilcetona, metilisobutilcetona, ciclohexanona, isoforona, diacetona alcohol.
- Glicolicos: Metoxipropanol, butilglicol, acetato de metoxipropanol, butilglicol, acetato de metoxipropilo, butildiglicol, acetato de butilglicol.
- Terpénicos: Aguarrás, dipenteno, aceite de pino.
- Clorados: Cloruro de metilo, tricloroetileno, tricloroetano.
- Varios: Tetralina, decalina, agua.

d) Aditivos:

Son productos químicos (compuestos metálicos u órgano-metálicos) de acción específica, que se añaden en pequeñas cantidades a los componentes principales del recubrimiento para conseguir una mejora de calidad, evitar defectos, producir efectos especiales, acelerar el endurecimiento, conferir tixotropía, matizar, etc. A pesar de que se adicionan en pequeñas cantidades, tienen gran influencia sobre la viscosidad y estabilidad del recubrimiento líquido, así como sobre el poder de nivelación y apariencia de la película ya aplicada.

Los más utilizados son:

- Humectantes y Dispersantes: Empleados para facilitar la mojabilidad del pigmento por el ligante, ya que aquellos son normalmente liófilos.
- Antiposos: Los pigmentos y cargas tienen mayor peso específico que el vehículo fijo y tienden a posarse. Este tipo de aditivos evita la formación de sedimentos.

- Antipiel: Las pinturas a base de ligantes de secado oxidativo pueden llegar a formar piel en el envase, debido a que éste normalmente no se llena totalmente.
- Espesantes: Utilizados para conseguir tixotropía o falsa viscosidad, normalmente en pinturas de capa gruesa.
- Mateantes: Se emplean para conseguir barnices o pinturas de aspecto mate o satinado, manteniendo unas buenas propiedades mecánicas de la película.
- Secantes: En las pinturas a base de ligantes de secado oxidativo se utilizan sales de cobalto, plomo, calcio, zinc, zirconio y manganeso principalmente, como catalizadores de la reacción para acelerar el secado y endurecimiento del film.
- Fungicidas: Algunas resinas por su composición, sirven de alimento a colonias de bacterias y hongos, lo que puede ocasionar el deterioro de la pintura, pérdida de viscosidad, putrefacción en el envase, o manchas y cambios de tonalidad en el producto aplicado. Estos aditivos son venenosos para las bacterias.
- Estabilizantes: Cuya misión es mantener estable la pintura en el envase hasta su utilización. Los hay de diferentes tipos como por ejemplo estabilizadores de la viscosidad, neutralizantes de la acidez del vehículo fijo, antioxidantes, etc.
- Plastificantes: Como su nombre indica, actúan plastificando las películas con el fin de conseguir un buen balance de propiedades mecánicas y de resistencias al medio agresivo. Intervienen en proporciones bastante altas en algunos tipos de pinturas como las fabricadas con caucho clorado o vinílicas, donde también ejercen un papel de ligante.
- Agentes absorbedores de rayos ultravioleta, entre otros.

2.1.4 Tipos de recubrimientos.

A la fecha se han desarrollado una gran diversidad de recubrimientos cuya formulación o composición obedece a la resolución de un problema específico, en tal forma se puede hablar de recubrimientos anticorrosivos cuya finalidad es proteger un sustrato de un medio corrosivo y se puede hablar de pinturas arquitectónicas las cuales se utilizan esencialmente para fines decorativos. Mientras los primeros, con fines de formulación, requieren de uso de resinas y pigmentos altamente resistentes que permitan una alta eficiencia de protección (objetivo de nuestro estudio), los segundos utilizan materias primas de menor resistencia que permiten obtener una gran diversidad de colores, tonos y efectos especiales.

En este trabajo, se discute lo concerniente a recubrimientos anticorrosivos, por ser de mayor interés técnico para el caso de tuberías enterradas y/o sumergidas. A continuación presentamos algunas clasificaciones que se toman en cuenta en la actualidad:

2.1.4.1 A partir del procedimiento que requiere el recubrimiento.

A partir del procedimiento que requiere el recubrimiento para alcanzar sus propiedades o características de operación o comportamiento:

a) Secado al aire, un solo componente:

La primera etapa considera una eliminación de solventes por evaporación a temperatura ambiente, posteriormente por una interacción con el aire, las moléculas de las resinas se unen o polimerizan en forma entrelazada, dando lugar a películas relativamente continuas de resina-pigmento.

Los recubrimientos alquidáticos, vinílicos y acrílicos son ejemplos de este tipo.

b) Secado al aire, dos componentes:

Nuevamente, la primera etapa es una eliminación de solventes a temperatura ambiente, desarrollándose simultáneamente una reacción de enlazamiento tridimensional entre las resinas de cada uno de los componentes, una de las cuales se denomina comúnmente catalizador. El tiempo requerido para que se lleve a cabo esta reacción de "curado" o polimerización, es del orden de 5 a 7 días⁷, superior a la etapa de eliminación de solventes, por lo tanto el recubrimiento no debe ponerse en operación en medios corrosivos fuertes o de inmersión antes de ese tiempo; los recubrimientos epóxicos y de poliuretanos secan y curan en esta forma.

c) Curado a alta temperatura:

La primera etapa considera la eliminación de solventes a temperatura ambiente, posteriormente y ante la incapacidad de la resina para reaccionar con el aire a bajas temperaturas, es necesario exponer el recubrimiento a temperaturas arriba de 100°C, lográndose en esa forma el entrelazamiento o curado requerido para alcanzar las características de operación o protección.

Dentro de este procedimiento de curado se incluye los recubrimientos al horno, que posterior a su curado trabajan a temperatura ambiente, y los recubrimientos resistentes a altas temperaturas, utilizados en la protección de instalaciones que operan a temperaturas muy superiores a la ambiente.

2.1.4.2 Por el tipo de resina usada en la fabricación.

Es necesario considerar que la resistencia del recubrimiento y su eficiencia de protección contra la corrosión, dependen esencialmente de las características y propiedades de los componentes de la película seca, representados por la resina y el pigmento. Con frecuencia, se relaciona o establece un cierto grado de calidad o eficiencia de protección con el tipo de resina utilizado:

a) Recubrimientos alquidáticos:

Es un recubrimiento económico, con buena retención de brillo y resistencia a medios ambientes secos o húmedos sin salinidad o gases corrosivos; presenta buena adherencia,

⁷ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

con poder de humectación y tolera cierto grado de impurezas en la superficie, por lo que con frecuencia es sólo suficiente, preparar la superficie metálica con una limpieza manual. La resina se seca debido a la evaporación de solventes e interacción con el aire.

Sus limitaciones están representadas por su baja resistencia a solventes fuertes como los compuestos aromáticos, éter, cetonas y compuestos solventes alifáticos como gasolinas, gas, nafta, etc. No es recomendable para una inmersión continua, su resistencia química es regular y especialmente mala en condiciones alcalinas, ante las cuales se saponifica y se destruye. No resiste productos alcalinos de la corrosión, por lo que una vez iniciada la corrosión bajo la película, ésta disminuye su adherencia. Por idénticos motivos, no se recomienda la aplicación de un alquidático sobre concreto, o sobre superficies de acero zincado o sobre un recubrimiento de zinc inorgánico. No se recomienda para exposiciones superiores a 60°C⁸.

b) Recubrimientos vinílicos:

Son recubrimientos no tóxicos resistentes a la abrasión, que pueden ser utilizados en la protección de superficies metálicas, resiste la inmersión continua en agua dulce o salada; resiste soluciones diluidas de la mayor parte de los ácidos orgánicos e inorgánicos, incluyendo HCl, HNO₃, H₃PO₄, H₂SO₄, ácido cítrico. No es afectado por derivados del petróleo tales como gasolina, diesel, petróleo crudo, etc. A temperatura normal, resisten soluciones de NAOH hasta el 40%; Na₂CO₃, Ca(OH)₂ y amoníaco hasta el 10%.

Proporcionan una superficie semibrillante con alta resistencia a la intemperie, aún en ambientes altamente húmedos y corrosivos. Entre sus limitaciones principales se tiene su baja resistencia a éteres, cetonas, inmersión en hidrocarburos clorados o solventes con más de 30% de aromáticos. Con el tiempo es afectado por los rayos del sol, presentando un deterioro superficial con apariencia de tizado. Se seca por evaporación de solventes. No se recomienda para exposiciones superiores a 55 °C⁹.

c) Recubrimientos epóxicos:

En términos generales, el nivel de adherencia, dureza, flexibilidad, gran tenacidad y resistencia a los medios corrosivos que presentan los recubrimientos epóxicos, no han sido superados por ningún otro tipo de los recubrimientos actuales. Puede aplicarse sobre superficies de concreto, metálicas, zincadas o recubiertas con zinc inorgánico; presenta una excepcional resistencia a medios alcalinos y buena resistencia a los medios ácidos; soporta salpicaduras, escurrimientos e inmersiones continuas de la mayoría de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, etc.

Presenta un alto grado de impermeabilidad, permaneciendo inalterable ante la exposición o inmersión en agua dulce, salada y vapor de agua. Estas características no las adquiere por sí solo, requiere de un agente de polimerización o entrecruzamiento denominado catalizador, el cual usualmente está constituido por una solución de resinas amínicas o poliamídicas. Los recubrimientos epóxicos están formados normalmente por dos componentes: la base y su catalizador. Según sea el caso, se deberán mezclar dichas partes para comenzar una reacción, que constituiría una red tridimensional muy

⁸ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

⁹ *Ibidem*.

compacta, la cual forma una capa dura y tersa que es el origen de la resistencia del producto. Sin embargo, dicha reacción no puede ser detenida. Una vez hecha la mezcla de base y catalizador, el tiempo de vida del producto líquido es corto, se deberá preparar la cantidad que calcule usar para la superficie a recubrir ya que el resto no podrá almacenarse sin que se endurezca¹⁰.

Su principal limitación considera la formación de un tizado superficial, sin menoscabo a sus propiedades de película, así como su alto costo relativo; además, a largo plazo tiende a fragilizarse. A corto plazo alcanza a desarrollar una superficie lisa y muy continua, la cual puede presentar problemas de adherencia durante el repintado o mantenimiento.

d) Recubrimientos epóxi-alquitrán de hulla:

Este recubrimiento se ha desarrollado específicamente para resolver problemas de inmersión continua en agua salada por muy largo tiempo y en el cual se combina la alta resistencia y características de un recubrimiento epóxico, con la alta impermeabilidad del alquitrán de hulla; no obstante, su resistencia a los solventes se ve afectada, por lo que no se recomienda una inmersión continua en los mismos; además por influencia del alquitrán de hulla, el recubrimiento tiende a cuartearse y tizarse, cuando se expone por largo tiempo a la acción de los rayos del sol.

e) Recubrimientos viníl-acrílicos:

Es un recubrimiento que combina la alta resistencia química y resistencia a la abrasión de los vinílicos, con la excepcional resistencia al intemperismo y rayos del sol de las resinas acrílicas; su poder de retención del brillo y color es superior a cualquiera de los recubrimientos desarrollados a la fecha, por lo que, además de ser resistente a medios salinos, ácidos y alcalinos, dando lugar a una alta eficiencia de protección contra la corrosión. Presenta características decorativas.

La presencia de la resina acrílica disminuye la resistencia a los solventes de tipo aromático, cetonas, ésteres y alifáticos, por lo que no se recomienda para inmersión continua.

f) Recubrimientos fenólicos:

Es un recubrimiento duro, brillante y muy adherente; en términos generales su resistencia a los solventes, medios ácidos y alcalinos, es moderada, por lo que no se recomienda para inmersiones continuas. En general su eficiencia de protección es ligeramente mayor a la de los alquidálicos. Si el recubrimiento es horneado, su resistencia a los solventes y al agua se incrementa considerablemente, llegando a soportar la inmersión en los mismos.

¹⁰ Química Marel. “*Pinturas y recubrimientos. Epóxicos*”. <en línea>
http://www.bioterra.com.mx/pinturas_exposicos.htm

g) Recubrimientos de silicona:

La alta estabilidad térmica de la resina permite la utilización de este tipo de recubrimientos hasta unos 750 °C; la película del recubrimiento resultante es resistente a la intemperie y a atmósferas contaminadas¹¹.

h) Recubrimientos antivegetativos:

Es un recubrimiento desarrollado para prevenir el crecimiento de organismos marinos, sobre superficies sumergidas por largos períodos. En su formulación se incluyen resinas vinílicas, brea, cobre o tóxicos órgano-metálicos, que permiten esta acción de inhibición. Este recubrimiento requiere una formulación cuidadosa a fin de que el tóxico abandone el recubrimiento pausadamente, y en cantidades suficientes para inhibir el crecimiento de los organismos marinos.

i) Recubrimientos de zinc 100% inorgánicos:

En cierta forma este recubrimiento es un "zincado o galvanizado en frío", en el cual la película es formada por la aplicación de una mezcla homogénea de polvo de zinc y una solución acuosa de silicato orgánico o inorgánico; la eliminación de agua y solventes e interacción de los componentes antes mencionados, permite obtener una película de silicato de zinc con oclusiones de zinc en polvo, por lo que finalmente su naturaleza es inorgánico. El mecanismo de protección de este recubrimiento difiere del correspondiente a los recubrimientos mencionados anteriormente; en lugar de presentar una barrera impermeable al medio corrosivo, se antepone a este una película de zinc con alta conductividad eléctrica, capaz de sacrificarse anódicamente para proteger el acero; es decir, lo protege a partir del principio de la protección catódica.

Dado que el espesor de la película y por lo tanto la cantidad de material disponible para el sacrificio es pequeña (2 a 2.5 milésimas de pulgada)¹², es necesario recubrirlo posteriormente con un acabado de tipo epóxico o vinil-epóxico, a fin de que la película de zinc inorgánico o de protección catódica, solo actúe en presencia de discontinuidades, grietas o raspaduras. Es un material muy resistente a la abrasión, muy adherente pero poco flexible. No se recomienda para inmersiones en ácidos o álcalis; resiste todos los solventes.

Los recubrimientos mencionados anteriormente, constituyen la línea básica que utilizan las más importantes industrias petroleras para la protección de sus instalaciones, no obstante, a la fecha se están llevando a cabo estudios de campo y en laboratorio, que permitan la inclusión de recubrimientos del tipo hule clorado y poliuretano, a través de las especificaciones correspondientes.

¹¹ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

¹² <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

2.1.4.3 Por el modo de llevar a cabo el secado y endurecimiento después de su aplicación.

a) Recubrimientos de secado por evaporación de disolventes:

En ellos el ligante (resina) no sufre ninguna variación durante el proceso de secado. Son resinas que previamente se han disuelto en disolventes adecuados y que después de la evaporación vuelven a su estado original. Los recubrimientos de este tipo una vez secos, son atacados por sus propios disolventes. Esto es una desventaja, sin embargo presenta la contrapartida de conferir una adherencia excelente entre capas.

A este grupo pertenecen los tipos a base de:

- Resinas nitrocelulósicas.
- Resinas vinílicas.
- Resinas de caucho clorado y ciclado.
- Poliolefinas cloradas.
- Resinas acrílicas termoplásticas.
- Alquitranes y asfaltos.
- Resinas naturales: Goma laca, corpal, etc.

Estas resinas presentan grados medios-altos de polimerización, a fin de conseguir buenas propiedades de resistencia, por lo que generalmente dan soluciones de alta viscosidad y por tanto las pinturas presentan bajo contenido en sólidos, si no se modifican con otras.

b) Recubrimientos de secado oxidativo por reacción con el oxígeno atmosférico:

En este tipo de pinturas, los ligantes se caracterizan por poseer ácidos grasos en su estructura. El secado se realiza por absorción de oxígeno del aire después de la evaporación de los disolventes. A este grupo pertenecen las pinturas a base de:

- Aceites vegetales (linaza, madera, ricino deshidratado).
- Resinas alquídicas modificadas con aceites secantes.
- Barnices fenólicos modificados con aceite de (madera, linaza).

Todavía hoy son los más utilizados por la excelente combinación de propiedades que reúnen, especialmente las que llevan resinas alquídicas como vehículo fijo.

c) Recubrimientos de secado por la acción de la temperatura:

En ellas, la polimerización del ligante se realiza por el calor externo aportado en hornos de convección, infrarrojos, etc. Las temperaturas oscilan entre 100 y 200°C en tiempos desde 5 y hasta 30 minutos. Destacan en este grupo, las pinturas formuladas con:

- Resinas alquídicas o poliéster combinadas con amínicas.
- Resinas epóxicas combinadas con fenólicas o amínicas.

- Resinas de silicona.

Este tipo de productos adquiere sus propiedades finales inmediatamente después de haber sido expuestas a la temperatura de polimerización en estufas, a diferencia de las que utilizan ligantes de secado oxidativo, en las que la adherencia, máxima dureza o resistencia a los agentes agresivos, pueden tardar semanas y meses en llegar a su nivel máximo.

d) Recubrimientos de secado por reacción química entre varios componentes:

En ellas debe producirse la reacción con un segundo componente denominado catalizador o endurecedor, añadido previamente a su aplicación. Debido a que la reacción se produce a temperatura ambiente, es necesaria la utilización en dos componentes, para evitar que se realice en el envase, con su consiguiente inutilización. Las más conocidas están fabricadas a base de:

- Resinas epóxicas con endurecedor de tipo amidas o aminas.
- Resinas de poliéster o hidroxiacrílicas endurecidas con isocianatos (Poliuretánicas).
- Resinas de poliéster catalizadas con peróxidos.
- Resinas de silicato, más polvo de Zinc.
- Alquitranses y resina epóxi o poliuretano.
- Resinas alquídicas catalizadas por ácido.

Estas pinturas, aunque precisan algunos días para alcanzar el endurecimiento total, después de conseguido presentan propiedades similares e incluso superiores a las de secado por temperatura, gracias a los elevados niveles de reticulación obtenidos en la reacción de los dos componentes. En el campo de la protección y conservación industrial son hoy en día las más utilizadas por sus altas prestaciones.

2.2 Selección para recubrimientos anticorrosivos en estructuras enterradas y/o sumergidas.

Para seleccionar adecuadamente un recubrimiento anticorrosivo para tuberías enterradas, sumergidas e interfases; es necesario considerar los siguientes factores:

2.2.1 Antecedentes de funcionalidad.

El sistema genérico de recubrimiento seleccionado debe contar con evidencia documentada de haber sido utilizado anteriormente en ductos, en este caso tuberías enterradas y/o sumergidas, e interfases. Se debe tener en cuenta que las condiciones ambientales, de diseño y de operación deben ser similares al ducto que se pretende proteger. Lo anterior debe contar con información nacional y/o internacional.

2.2.2 Temperatura de operación.

El sistema de recubrimiento anticorrosivo debe conservar sus propiedades protectoras a la temperatura de servicio del ducto. Dentro de las normas *ASTM* (Sociedad Americana para Ensayos de Materiales) y *CSA* (Organización Canadiense de Estándares), hay algunas que muestran los sistemas genéricos de recubrimientos y sus requerimientos mínimos de aceptación para su selección.

2.2.3 Tipo de suelo y/o agua.

Para el caso de proyectos nuevos, el diseñador debe contar con información relacionada al tipo de suelo y/o agua, entre otros:

- Tipo de suelo: arcilloso, rocoso, calcáreo, fangoso, ácido, básico, etc.
- Concentración de sales en el suelo o agua.
- Porosidad del suelo.
- Otros contaminantes en suelo y/o agua.
- Resistividad del suelo¹³.

Sobre estos puntos antes mencionados, se comentó ampliamente en el capítulo I.

2.3 Preparación de superficies.

El acero es el material de construcción más ampliamente utilizado en la fabricación de equipos e instalaciones. Desde el punto de vista de preparación de superficies los principales contaminantes están representados, además de la grasa, aceite y suciedad, por la escoria y escama de laminación y la herrumbre. Inicialmente, tanto la escoria como las escamas pueden estar firmemente adheridas, no obstante, por efectos de dilatación y contracción térmica del material, estas impurezas tienden a desprenderse, por lo que cualquier recubrimiento que se aplique sobre ellas puede sufrir el mismo efecto. Por otra parte, estas impurezas incluyendo la herrumbre, son más nobles en la serie galvánica, por lo que actúan como todos en presencia de humedad, acelerando la corrosión del acero. En la figura 1.1 vemos como una impureza de herrumbre contribuye a la ruptura de la película por su avidez de humedad ocasionando el ampollamiento y la corrosión del metal bajo película.

¹³ Pemex NRF-026 PEMEX-2001. “Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas”. pp. 12-13. <en línea>
<http://www.pemex.com/files/standards/definitivas/nrf-026-pemex-2001.pdf>

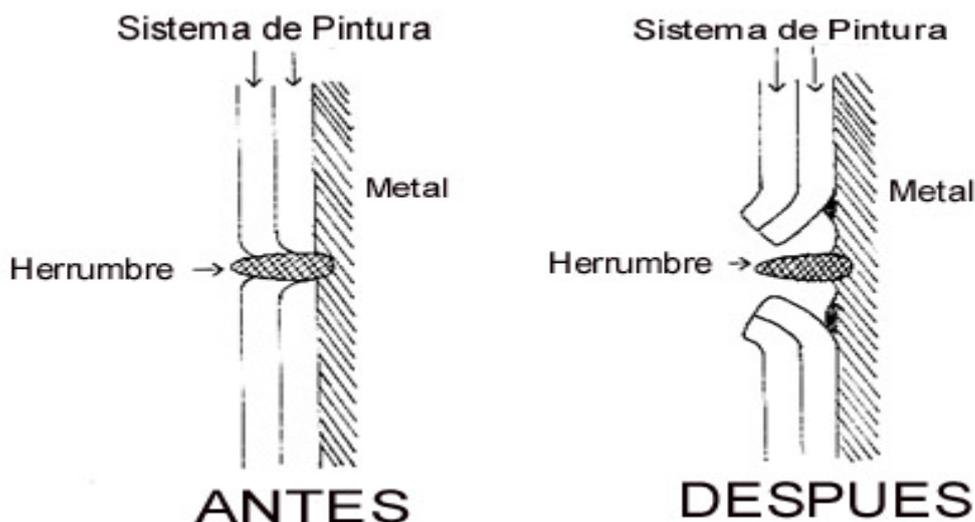


Figura 2.1. El antes y después de una estructura metálica mal preparada¹⁴.

Se sabe que la preparación de las superficies es el aspecto más crítico en el desempeño de los recubrimientos, por lo que será necesario extremar la vigilancia en la realización de esta operación y para ello se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Verificar que el tipo de limpieza sea correspondiente a cada uno de los sistemas de recubrimiento seleccionado.
- El grado de limpieza que especifique el fabricante debe corresponder con alguno de los grados mencionados en el apartado 2.3.4.
- La humedad relativa del ambiente durante la aplicación del recubrimiento, debe cumplir con los parámetros especificados en las normas correspondientes. La adherencia de la mayoría de las pinturas, excepto las de base acuosa, resulta seriamente dañada si la superficie por recubrir es contaminada con agua. En general debe evitarse pintar cuando la humedad relativa sea mayor de 85%.
- La temperatura debe estar por lo menos 5°C arriba del punto de rocío (es la temperatura a la cual se inicia la condensación sobre la superficie del acero)¹⁵. El rango de temperatura óptima para la aplicación de recubrimiento oscila entre 15°C y 32°C. Generalmente, los recubrimientos no deben ser aplicados cuando la temperatura del medio ambiente sea inferior a 4°C o superior a 43°C, durante la aplicación. Si la pintura es aplicada arriba de 32°C puede ocasionar que la película seque demasiado pronto y traiga como consecuencia falta de uniformidad en la película y mala adherencia. Si la temperatura es inferior a 10°C puede alargarse el tiempo de secado y curado de la película hasta puntos inaceptables. No debe aplicarse la pintura, si existe la posibilidad de que la temperatura baje al punto de congelación, antes de que ésta haya secado.

¹⁴ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

¹⁵ Pemex NRF-026 PEMEX-2001. "Protección con recubrimientos anticorrosivos para tuberías enterradas y/o sumergidas". 43 pp. <en línea>

<http://www.pemex.com/files/standards/definitivas/nrf-026-pemex-2001.pdf>

- Las operaciones de pintura, sobre todo las aplicaciones por medio de aspersión, se hace más difícil cuando aumenta la velocidad del viento. Además de la gran cantidad de pintura desperdiciada cuando hay viento fuerte, la apariencia de la superficie pintada generalmente no alcanza la conformidad deseada, porque las partículas atomizadas secan antes de tocar la superficie. Asimismo las partículas de pintura en suspensión en el aire pueden llegar a contaminar áreas adyacentes.
- Ninguna aplicación de recubrimientos debe ser hecha en presencia de precipitación o cuando ésta es inminente. La precipitación puede:
 - Causar mala adherencia
 - Erosionar la pintura fresca
 - Depositar contaminantes químicos
 - Causar manchas en la pintura
 - Alterar las propiedades de la película
- El perfil de anclaje debe cumplir las especificaciones del fabricante y debe ser a la vez avalado por el inspector.
- La preparación de la superficie a recubrir debe cumplir con dos criterios: el grado de limpieza y el perfil de anclaje, los cuales deben ser especificados por el fabricante, dependiendo de cada sistema de recubrimientos seleccionado.

2.3.1 Criterios de aceptación.

a) Grado de limpieza:

Es la clasificación relacionada con la condición superficial de la tubería en cuanto a la presencia de residuos y contaminantes.

Se considera la superficie limpia o preparada por recubrirse, cuando no haya huellas de grasa, aceite u otras sustancias extrañas. Su aceptación es bajo criterio de examen visual según los patrones descritos en los apartados 2.3.2.1, 2.3.2.2, 2.3.2.3, 2.3.2.4, 2.3.2.5, 2.3.2.6 y 2.3.2.7. La calificación del grado de limpieza debe realizarse mediante la comparación con patrones de limpieza reconocidos internacionalmente, como por ejemplo: el comparador visual NACE TM 0175, o fotográficos como el ISO 8501-1:1988 ó el SSPC VIS 1-89¹⁶.

b) Perfil de anclaje:

Se considera como la profundidad de la rugosidad máxima del perfil que se obtiene mediante la preparación de la superficie del sustrato.

Para comprobar que la profundidad del anclaje es la especificada, la superficie preparada debe ser comparada con la del patrón aceptado para cada sistema de recubrimiento, utilizando la lámpara comparadora de anclaje. Además, se pueden emplear también métodos como la medición directa del perfil de anclaje por medio de un rugosímetro de aguja o la medición indirecta del mismo, mediante el uso de cinta réplica y un micrómetro de yunque¹⁷.

¹⁶ Pemex NRF-026 PEMEX-2001. *art. cit.*

¹⁷ *Ibidem.*

2.3.2 Tipos de limpieza.

2.3.2.1 Limpieza química (SSPC-SP-8):

Método para limpieza de metales, mediante reacción química, electrólisis o por medio de ambos. A través de una reacción química con algún producto específico, las superficies metálicas son liberadas de escamas, óxido, pintura, aceite, grasa, polvo y materiales extraños, posteriormente la reacción es neutralizada con alguna otra solución y secada con aire o vacío.

El procedimiento que se menciona a continuación, constituye un proceso completo de preparación de superficies o auxiliar en combinación con otros procedimientos.

1.-**Procedimiento:** La limpieza química consta de las siguientes operaciones, que de acuerdo con las condiciones y especificaciones de cada obra, se podrá eliminar o modificar cualquiera de las que se mencionan a continuación:

a) Las capas gruesas de grasa y contaminantes deberán eliminarse con rasqueta, espátula y otro medio.

b) Los nódulos de corrosión deberán eliminarse con herramientas de impacto.

c) El producto químico seleccionado se aplicará con brocha o por aspersión, dejándose sobre la superficie el tiempo de contacto suficiente para su acción. Si se emplean productos de marcas comerciales, las soluciones deberán prepararse y aplicarse de acuerdo con las instrucciones del fabricante.

d) Posteriormente, la superficie debe ser lavada con agua dulce para eliminar todos los residuos. Para probar la efectividad del lavado, debe hacerse la prueba con papel indicador de pH sobre el acero húmedo, hasta obtener un valor igual al del agua empleada.

2.3.2.2 Limpieza con solvente (SSPC-SP-1):

Es llamada limpieza con solvente, sin embargo está basado en la utilización de productos tales como: vapor de agua, soluciones alcalinas, emulsiones jabonosas, detergentes y solventes orgánicos. Mediante este método son removidos la mayoría de los contaminantes como: grasa, aceite, polvo y sales solubles en el agente limpiador. La solución limpiadora es aplicada suavemente o mediante equipo de presión, seguido de un lavado con agua natural y secado con equipo de vacío o simplemente utilizando aire seco.

En caso de usar solventes, a continuación se presenta una lista de los comúnmente usados:

Tabla 2.1. Listado de los solventes más usados con su respectiva norma de uso¹⁸.

<i>Solvente</i>	<i>ASTM</i>
<i>Naftas del petróleo</i>	<i>D-838</i>
<i>Tolueno (Toluol)</i>	<i>D-362</i>
<i>Percloroetileno</i>	<i>D-3316</i>
<i>Xileno (Xilol)</i>	<i>D-364</i>
<i>Metil isobutilcetona</i>	<i>D-1153</i>
<i>Benceno</i>	<i>D-836</i>
<i>Dimetil formamida</i>	<i>D-2764</i>

2.- Aspecto: Para aceptar una superficie preparada con limpieza química, deberá tener el mismo aspecto que una área de un metro cuadrado seleccionada previamente como patrón, y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar.

3.-Precauciones: Para la ejecución de estos trabajos deberán atenderse los ordenamientos de seguridad recomendados.

2.3.2.3 Limpieza manual (SSPC-SP-2):

Es la preparación de la superficie metálica que se va a recubrir, eliminando óxido, escamas de laminación y pintura suelta, mediante el uso de martillo, cincel, brochas, espátulas, piquetas, lijas o cepillos de alambre, etc. Se utiliza generalmente para eliminar impurezas, tales como: residuos de soldaduras, herrumbre, pintura envejecida y otras incrustantes que puedan ser removidos con el solo esfuerzo humano.

Las etapas de que puede constar el procedimiento de limpieza manual para la preparación de superficies, se indican a continuación; pudiendo eliminarse parcial o totalmente alguno de los pasos que se mencionan.



Figura 2.2. Limpieza con cepillo tipo tubo.

¹⁸ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/preps.htm>

1.- Procedimientos: A continuación mencionaremos los distintos tipos de limpieza mecánica utilizada en la industria según sea la necesidad:

a) Descostrado: Con ayuda de espátulas, martillo y cincel se quitaran las costras de oxido, escamas y restos de soldadura o escorias.

b) Lavado: Mediante el uso de solventes o detergentes deberán eliminarse toda clase de materias extrañas como aceites y grasas.

c) Rasqueteo: Las superficies deberán rasquetearse para eliminar depósitos de oxido, pintura o cualquiera otra materia extraña.

d) Cepillado: En todos los casos, la superficie debe frotarse con cepillo de alambre de acero, hasta desaparecer los restos de oxido, pintura, u otras materias extrañas.

e) Lijado: Los restos de oxido, pintura, etc., que no se desprendan por medio de las operaciones anteriores, deberán lijarse, para obtener un anclaje adecuado.

f) Eliminación de polvo: La superficie se deber limpiar, con brocha de cerda o cepillo para eliminar las partículas de polvo. Se podrá hacer este trabajo también sopleteando la superficie con un chorro de aire seco y limpio. Tratándose de tableros e instrumentos eléctricos y neumáticos, se usara una aspiradora.

g) Uso de herramienta neumática o eléctrica: Algunas de las etapas antes señaladas, pueden realizarse mediante el uso de herramientas neumáticas o eléctricas portátiles.

2.- Aspecto: Se considera la superficie limpia o preparada para recubrirse, cuando solo presente restos de óxido o pintura bien adheridos y que no haya huellas de grasa, aceite y otras sustancias extrañas.

3.- Aceptación de la superficie limpia: Para aceptar una superficie preparada manualmente, deber tener el mismo aspecto que un área de un metro cuadrado, seleccionada previamente como patrón y representativa de las condiciones generales.

2.3.2.4 Limpieza con abrasivos:

Es la preparación de la superficie metálica que se va a recubrir, mediante la aplicación de abrasivos a presión; los abrasivos comúnmente empleados son arena sílicea y granalla metálica.

A) Limpieza con chorro de arena:

Por su bajo costo la arena es el abrasivo más utilizado; además por su dureza no se rompe fácilmente al chocar con la superficie de acero. La arena deberá tener un tamaño de partícula inferior a la malla 18, ya que tamaños mayores (abajo de la malla 16) sólo martillean la superficie sin limpiar pequeñas cavidades; por otra parte, el tamaño de partícula debe ser superior a las del tamiz de malla 80, a fin de evitar el polvo que producen las partículas muy pequeñas (arriba de la malla 80). Además de la

clasificación de la arena, es necesario que ésta se encuentre libre de sales, grasa, aceite y suciedad que pudiera contaminar la superficie¹⁹.

Este es el método más eficaz en la preparación de superficies de acero, además de eliminar eficientemente el óxido, la suciedad, herrumbre, escamas de laminación, pintura suelta, escoria y otros contaminantes, proporciona una superficie áspera de color gris uniforme, excelente para promover una buena adherencia del recubrimiento.

1.-Procedimiento: Consta de las siguientes operaciones y de acuerdo con las condiciones de la superficie o especificaciones de cada obra, se podrá eliminar o modificar la ejecución de cualquiera de estas operaciones.

- a)* Se hará un descostrado como se especifica en el procedimiento de limpieza manual
- b)* Los depósitos de óxido, pintura y cualquier otra sustancia extraña, serán totalmente removidas de la superficie por medio del chorro de abrasivo.
- c)* El agente abrasivo debe ser clasificado, como ya se indicó, entre mallas 18 y 80 de acuerdo al patrón de anclaje requerido. Cuando se use arena, ésta será cuarzosa o silicosa, lavada y seca y no deberá estar contaminada con sales. Cuando se use granalla metálica, ésta será del tipo munición acerada limpia y seca, ó escoria de cobre.
- d)* La rugosidad o máxima profundidad del perfil que se obtenga en la superficie limpia y que servirá como anclaje para el recubrimiento, estará comprendida entre 1 y 2.5 milésimas de pulgada (0.025-0.0625 mm)²⁰ de acuerdo con el espesor de película del recubrimiento primario, el cual deberá ser mayor que la profundidad del perfil o anclaje.
- e)* El aire usado debe estar exento de humedad, aceite o grasa.
- f)* Una vez efectuada la limpieza, cuando se emplee chorro de arena, se hará una eliminación del polvo como se detalla en el procedimiento de limpieza manual.
- h)* La granalla metálica podrá usarse nuevamente en limpiezas posteriores, siempre y cuando este libre de contaminantes, seca y tamizada de acuerdo a las mallas señaladas en el inciso "c".

2.-Aceptación de la superficie limpia:

- a)* Para aceptar una superficie preparada con abrasivo, debe tener el mismo aspecto que un área de dos metros cuadrados seleccionada previamente como patrón y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar.
- b)* Para comprobar que la profundidad de anclaje es la especificada, la superficie preparada se comparará con la del patrón aceptado, utilizando la lámpara comparadora de anclaje.

¹⁹ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

²⁰ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/preps.htm>

3.-Tiempo máximo para recubrir: En cualquier caso en que se haya hecho la preparación, ya sea con arena o granalla metálica, el tiempo máximo que transcurra entre la limpieza y la protección de la superficie, dependerá del ambiente en que se opere, pero nunca podrá ser mayor de 4 horas.



Figura 2.3. Limpieza con chorro de arena²¹.

- Grados de Limpieza con chorro de arena:

El equipo de limpieza con chorro de arena considera un depósito de fluidización de abrasivo, un compresor o línea de aire comprimido, mangueras y boquillas.



Figura 2.4. Superficie metálica en estado inicial (sin limpieza)²².

Dependiendo del tipo de recubrimiento para utilizar, en la práctica se utilizan tres grados de limpieza con chorro de arena:

a) Limpieza con chorro de abrasivo grado ráfaga (SSPC-SP-7, NACE-4): Eliminación con chorro de arena de todo material suelto, excepto residuos de escamas de laminación, óxido y pinturas que estén bien adheridas, exponiendo uniformemente distribuidas numerosas áreas de metal limpio.

Este tipo de limpieza remueve las escamas sueltas, productos de óxidos y residuos de pintura sueltos. La superficie debe quedar libre de grasa, aceite, polvo, oxido flojo, escama de laminación floja y cualquier recubrimiento o sustancia adherida o suelta. Las

²¹ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

²² <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

escamas, óxidos, o pinturas fuertemente adheridas; pueden observarse sobre la superficie y para cerciorarse de su adherencia, puede utilizarse una espátula sin filo.

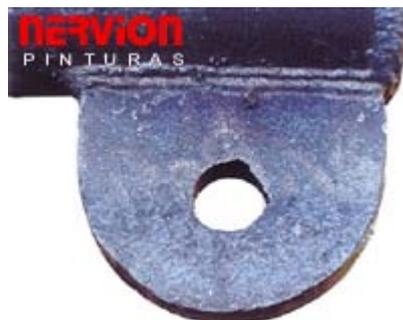


Figura 2.5. Superficie metálica limpiada con chorro de abrasivo grado ráfaga²³.

b) Limpieza con chorro de abrasivo acabado grado comercial (SSPC-SP-6, NACE-3): Este grado de limpieza elimina, grasa, polvo, óxido, escama de laminación, aceite, recubrimiento viejo y otros contaminantes o sustancias extrañas, en por lo menos 2/3 ó 66% de cada unidad de área de superficie, dejando a ésta de color gris oscuro sin que necesariamente sea uniforme, con ligeras sombras o coloraciones. Estas sombras no deben ser mayores de 1/3 ó del 33% de cada unidad de área de superficie. Si la superficie está picada pueden presentarse residuos de óxido y recubrimiento viejo.



Figura 2.6. Superficie metálica limpiada con chorro de abrasivo acabado grado comercial²⁴.

c) Limpieza con chorro de abrasivo grado metal blanco (SSPC-SP-5, NACE-1): Este grado de limpieza se aplica cuando se requiere una excelente preparación de superficie. Se le considera la limpieza ideal del acero. La superficie queda de color gris claro uniforme, sin manchas y variará según el abrasivo usado. El 100% de la superficie deberá estar libre de grasa, aceite, polvo, óxido, escama de laminación, recubrimiento viejo o cualquier otro contaminante. La eliminación se hace mediante chorro abrasivo (seco o húmedo) de arena o granalla metálica.

²³ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

²⁴ *Ibidem*.



Figura 2.7. Superficie metálica limpiada con chorro de abrasivo acabado metal blanco²⁵.

d) Limpieza con chorro de abrasivo grado cercano a blanco (SSPC-SP-10, NACE-2): Método para preparar superficies metálicas, mediante abrasivos a presión, a través del cual es removido todo el óxido, escama de laminación, pintura y materiales extraños.

La superficie debe tener un color gris claro y deben eliminarse sombras de oxidación visibles en un 95%. De hecho la diferencia entre una limpieza con chorro de arena grado metal blanco y metal cercano al blanco, radica en el tiempo empleado para pintar, ya que el metal es atacado por el medio ambiente y pasa a ser grado cercano al blanco en poco tiempo.

B) Limpieza con granalla metálica.

Este abrasivo considera fragmentos de acero o hierro vaciado, con bordes duros y cortantes, que prácticamente no produce polvo y limpia rápidamente. Sus desventajas principales son: producir una superficie demasiado áspera que requiere de mayor número de manos de recubrimiento para cubrir las crestas y que en presencia de humedad atmosférica puede llegar a oxidarse; en este caso si es utilizada, contamina la superficie. No se recomienda el uso de munición de hierro o acero por su baja eficiencia de limpieza.

En la siguiente tabla, podemos observar la profundidad de anclaje obtenida empleando la arena silíceo y en el caso de la granalla metálica:

Tabla 2.2. Listado de los abrasivos más usados y su profundidad de anclaje²⁶.

<i>Abrasivo</i>	<i>Profundidad del anclaje (mils)</i>
<i>Arena muy fina (80 mallas)</i>	<i>1.5</i>
<i>Arena fina (40 mallas)</i>	<i>1.9</i>
<i>Arena mediana (18 mallas)</i>	<i>2.5</i>
<i>Gravilla de Acero G-50 (25 mallas)</i>	<i>3.3</i>
<i>Gravilla de Acero G-40 (18 mallas)</i>	<i>3.6</i>
<i>Gravilla de Acero G-25 (16 mallas)</i>	<i>4.0</i>
<i>Gravilla de Acero G-16 (13 mallas)</i>	<i>8.0</i>

²⁵ <http://www.nervion.com.mx/web/Tecnologia/fundamen.htm>

²⁶ *Ibidem.*

2.3.2.5 Limpieza con herramientas mecánicas (SSPC-SP-3):

El procedimiento que se menciona a continuación, constituye un proceso completo de preparación de superficies de acero. Este método es satisfactorio para retoques y reparaciones, es usado en muchas ocasiones en combinación con otros métodos de limpieza. La limpieza mecánica, es un método que utiliza herramienta eléctrica o neumática. A través de este método, generalmente no es posible desprender completamente todas las incrustaciones.

1.-Procedimiento: La limpieza con herramientas mecánicas consta de las siguientes operaciones:

- La herrumbre estratificada y toda la escoria de la soldadura, deberán eliminarse con herramienta mecánica de impacto.
- Las cascarilla de laminación, herrumbre y toda la pintura floja; deberán eliminarse con cerdas, cepillos neumáticos, esmeriles o cualquier dispositivo de impacto.

2.-Aspecto: Bajo un criterio de examen visual, selecciona un área que sirve como patrón y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar y se compara con la superficie limpia con herramienta mecánica.



Figura 2.8. Esmeril.



Figura 2.9. Distintos tipos de cepillos mecánicos.



Figura 2.10. Lijador mecánico.

2.3.2.6 Limpieza con flama (SSPC-SP-4):

Este método consiste en pasar sobre las superficies metálicas, altas temperaturas a alta velocidad.

Generalmente se usa flama de acetileno. Una vez aplicada la flama a la superficie, ésta debe limpiarse con cepillo de alambre para eliminar la escama floja y el óxido. La pintura primaria deberá aplicarse antes de que la superficie esté completamente fría.

2.3.2.7 Limpieza por agentes atmosféricos (SSPC-SP-9):

Consiste en la remoción de pintura, escamas de laminación u óxido, por medio de la acción de agentes atmosféricos, seguido de alguno de los métodos de limpieza mencionados anteriormente.

La alteración debida a agentes atmosféricos, usualmente no constituye un método efectivo en la preparación de superficies, por lo que debe ir siempre acompañado de alguno de los métodos sugeridos en este documento, ya sea con herramientas mecánicas o mediante la aplicación de chorro de abrasivo.

2.4 Sistemas de aplicación de recubrimientos.

Anteriormente se enfatizó sobre la importancia de la preparación de superficies para el buen comportamiento de un recubrimiento; igualmente importante resulta su correcta aplicación.

Independientemente del procedimiento utilizado en la aplicación, debe tenerse cierto cuidado con el almacenamiento y el acondicionamiento de los materiales de protección. En general, las latas de recubrimiento nunca deben ser expuestas a la lluvia y a la acción directa de los rayos del sol, o cualquier fuente de calor; a fin de evitar la gelación prematura o evaporación de solventes del recubrimiento, acortando excesivamente su vida útil, por lo que siempre deben almacenarse en un local cubierto.

Antes de utilizar el recubrimiento, este deber ser homogeneizado y acondicionado para su uso correcto, esto puede llevarse a cabo en la siguiente forma:

a) Destapar y homogeneizar el recubrimiento con una paleta u otro medio adecuado, y pasar una quinta parte a otro recipiente limpio más grande.

b) Agitar el contenido del recipiente original hasta lograr que todos los sólidos adheridos a las paredes y fondo se reincorporen en forma homogénea; el almacenamiento prolongado tiende a provocar estos asentamientos.

c) Pasar con agitación continua la mezcla original al recipiente grande y viceversa varias veces.

d) Si el recubrimiento es de 2 componentes, estos deberán mezclarse poco antes de la aplicación hasta obtener una mezcla homogénea, conservando la proporción indicada en la especificación correspondiente; además es de gran importancia vigilar el tiempo de vida útil de la mezcla, dato que también aparece en dicha especificación.

e) Filtrar el recubrimiento pasándolo a través de una malla, a fin de eliminar natas, grumos, pintura seca o cualquier material extraño, procurando que el filtrado quede en el recipiente grande.

f) Ajustar la viscosidad del recubrimiento con los solventes apropiados para su correcta aplicación. Para aplicación con brocha o rodillo, su consistencia o viscosidad debe ser equivalente a 50-60 segundos; para aplicación por aspersión con aire, la consistencia debe ser equivalente a 22-28 segundos.

En estas condiciones, el recubrimiento está listo para su aplicación.

- Durante la aplicación se deberán tomar las siguientes precauciones:

a) Si la superficie se encuentra húmeda por efectos de lluvia o condensación de humedad atmosférica, debe suspenderse toda operación de aplicación; incluso si la temperatura está por abajo de 10°C.

b) Si la superficie fue preparada con chorro de arena, el recubrimiento no deberá aplicarse después de 3 horas de efectuada la limpieza, debido a los posibles efectos de corrosión en la superficie. Si las condiciones ambientales son críticas, este tiempo es menor.

2.4.1 Criterios para la aplicación de recubrimientos.

2.4.1.1 Restricciones en la aplicación.

No se permitirá la aplicación del recubrimiento anticorrosivo si se presenta cualquiera de las siguientes condiciones:

a) El contratista o aplicador no cuenta o no cumple con los procedimientos y equipos correspondientes.

b) Preparación de superficie inadecuada.

c) Las condiciones de temperatura y humedad no adecuadas.

d) Medidas de seguridad, salud y protección ambiental inapropiadas.

2.4.1.2 Inspección antes, durante y después de la aplicación.

Antes de la aplicación se debe verificar lo siguiente:

a) Materiales:

- La superficie de la tubería debe cumplir con los parámetros especificados de acuerdo al recubrimiento por aplicarse.
- El abrasivo de limpieza debe ser del tipo, contenido de sales y granulometría especificado para cada sistema de recubrimiento.
- Verificar que la profundidad del perfil de anclaje y grado de limpieza, sean las especificadas para el recubrimiento por aplicar.

b) Materiales para recubrimientos:

- Se deben verificar que los materiales para recubrimientos sean los especificados por el usuario o el diseñador en la ingeniería del proyecto, conforme a dimensiones, cantidad y que dichos materiales no hayan caducado para cuando vayan a ser aplicados.
- Dichos componentes deben de ser del mismo proveedor.
- La mezcla de componentes (cuando aplique), se haga conforme a las especificaciones del sistema por aplicar.
- Una vez hecha dicha mezcla, se observen con detalle los tiempos de caducidad de los componentes mezclados, además de estar debidamente identificados y que contengan los procedimientos de aplicación y las condiciones de almacenamiento de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

c) Equipos e instalaciones:

El inspector debe verificar que los equipos e instalaciones del contratista o aplicador, sean los adecuados para el tipo de recubrimiento y sea el especificado por el fabricante.

Estos deben de estar en óptimas condiciones de operación, con los instrumentos funcionando correctamente y con las condiciones de trabajo, seguridad, salud y protección del medio ambiente adecuadas.

d) Personal:

El inspector debe verificar que el personal participante en la aplicación del recubrimiento tenga los conocimientos y experiencia sobre el sistema anticorrosivo a aplicar, esté capacitado y sea autorizado por el fabricante para realizar la aplicación; así como disponer de los equipos de seguridad necesarios para el trabajo.

Además debe cumplirse con lo antes mencionado en el apartado 2.3.

Durante la aplicación del recubrimiento se debe verificar lo siguiente:

- La temperatura, los tiempos de curado y secado deben ser los especificados por el fabricante, así como verificar la homogeneidad en las diferentes capas del recubrimiento.
- Se debe verificar el espesor de película húmeda.
- En el caso de cintas, se debe verificar que la tensión de aplicación sea la correcta.

Después de la aplicación del recubrimiento:

- El contratista debe realizar con un detector, una inspección de discontinuidad eléctrica de todo el recubrimiento exterior aplicado a la tubería, para localizar fallas como son: partes sin revestir, picaduras, grietas y discontinuidades. Cualquier falla detectada o no cumplimiento de los requerimientos, debe ser marcado en forma visible y registrado para proceder a su reparación.
- El espesor del recubrimiento debe ser inspeccionado de acuerdo a especificaciones establecidas, dependiendo del material de recubrimiento utilizado.
- El número de capas y espesor de película deben cumplir con las especificaciones del sistema.
- El contratista debe mostrar evidencia de los resultados de las pruebas especificadas para el sistema de recubrimiento aplicado sobre la tubería, mediante las cuales se compruebe que el recubrimiento cumple con las especificaciones correspondientes sin ser limitativo, entre otras:
 - Adherencia.
 - Curado.
 - Espesores de película.
 - Apariencia del producto después de aplicado.
 - Continuidad de película.

2.4.2 Métodos de aplicación.

Actualmente existen varios métodos para aplicar recubrimientos, tales como: brocha, rodillo, equipo de aspersión con aire y equipo por aspersión sin aire. Cada uno de estos métodos tiene una razón de ser; sus ventajas y desventajas así como sus limitaciones. Es el usuario quien debe evaluar las alternativas existentes respecto a sus necesidades específicas, las razones operativas y las ventajas económicas que el uso de cada método implica, en la elección final.

A continuación mostramos una tabla comparativa de los rendimientos, que de acuerdo a nuestra experiencia y en condiciones óptimas tendría cada uno de estos métodos, con el fin de que el usuario pueda elegir aquel que más se adapte a sus requerimientos.

Tabla 2.3. Tabla comparativa de los rendimientos²⁷.

METODO	RENDIMIENTO DIARIO (metros cuadrados)
<i>Brocha</i>	90
<i>Rodillo</i>	185 - 370
<i>Aspersión con aire</i>	370 - 740
<i>Aspersión (sin aire)</i>	740 - 1100

2.4.2.1 Aplicación con brocha de pelo y rodillo.

La aplicación con brocha es un procedimiento que ha sido utilizado durante muchos años y no requiere de una discusión muy extensa; no obstante, es necesario puntualizar algunos aspectos. En comparación con otros métodos resulta excesivamente lento, por lo que debe preferirse para materiales de dimensiones pequeñas o de conformación difícil, además, presenta cierta dificultad para un control de espesor de película eficiente. Entre sus ventajas más sobresalientes se pueden mencionar las pérdidas mínimas de material de recubrimiento y la fácil humectación aún en áreas difíciles, además los costos por equipo son mínimos.

a) Selección y aplicación con brocha.

Para seleccionar y posteriormente aplicar el recubrimiento con brocha de pelo, es conveniente observar las siguientes recomendaciones:

1.-Selección:

El tamaño de la brocha dependerá del área por recubrir, las de tamaño reducido se utilizan en áreas pequeñas o intrincadas, las más anchas se utilizan en áreas extensas preferentemente planas. La máxima eficiencia de aplicación se obtiene con brochas de pelo de caballo, aún cuando en ciertos casos se puede utilizar una combinación de esta cerda natural y fibra sintética, con la consecuente disminución en la eficiencia de aplicación. El número de cerdas de la brocha es importante y generalmente va en función del precio. Las de bajo costo tienen pocas cerdas por cada cm. de ancho en comparación con las de buena calidad, por lo que al mojarse en recipiente de recubrimiento retienen muy poco material; por otra parte, las cerdas en brochas de baja calidad son gruesas, dejando una cantidad excesiva de huellas o surcos que dificultan la nivelación del recubrimiento y por tanto la obtención de espesores uniformes, además las cerdas se desprenden con facilidad.

2.-Aplicación:

La brocha nunca deberá sumergirse más de la mitad de la longitud de las cerdas, evitándose así la necesidad de eliminar el exceso de recubrimiento en el borde del recipiente, eliminándose las pérdidas de material por este concepto. Si se sumerge más de lo debido, el recubrimiento tenderá a alcanzar la base de la brocha y allí no puede ser aplicado; en este sitio pierde solventes, se vuelve más viscoso y empieza a secar haciendo cada vez mas dura la brocha por lo que se requiere mayor fuerza en

²⁷ <http://www.psm-dupont.com.mx/paginas/aplicacion.htm>

aplicaciones subsecuentes. Esta acción de frotación acelera la evaporación de solventes aumentando la consistencia o viscosidad del recubrimiento y restándole la posibilidad de un buen flujo y nivelación.

Debe fomentarse, como se dijo anteriormente, donde las áreas que van a cubrirse no son sencillas. Para las áreas donde se permite la aplicación, probablemente será necesario que el pintor use además una brocha para cubrir las áreas difíciles, por Ej.: los puntos de conexión con pernos, soldaduras, etc. Cuando se concluye, el revestimiento de faja, también llamado así, habrá puesto una capa extra de pintura sobre esas áreas que de otro modo, no pueden retener un revestimiento aplicado de spray completo, es decir los bordes afilados, etc.

Un pintor de experiencia conoce el área aproximada que puede recubrir con cada inmersión de la brocha a un espesor determinado, por lo que con un mínimo de brochazos, extiende el material y obtiene un espesor uniforme, en la práctica esto equivale a una "mano" de recubrimiento. Un profesional en este campo siempre mantiene la brocha a un ángulo de 45° con respecto a la superficie, extendiendo el material de la zona sin recubrir a zonas ya cubiertas, cambiando en 90° , el sentido de los últimos brochazos de retoque, en forma tal que toda la superficie recubierta tenga el mismo sentido.



Figura 2.11. Brochas para pintado.

b) Aplicación con rodillo.

Aún cuando este método es más rápido que la brocha, particularmente para las áreas grandes, la calidad del trabajo es generalmente inferior al uso de la brocha, desde el punto de vista de protección a largo plazo.

Estos dispositivos de aplicación se desarrollaron para reducir el tiempo de aplicación en superficies planas. En el mercado, existen gran variedad de formas y tamaños. Los rodillos generalmente se construyen de lana natural, aunque con frecuencia se les combina con fibras sintéticas. La apariencia del recubrimiento depende en gran parte de la profundidad del rodillo; los de fibra corta producen acabados tersos o lisos. Algunos tipos requieren de un recipiente de recubrimiento para sumergir y exprimir el rodillo aún cuando los más convenientes tienen una línea de alimentación automática de baja presión, la cual pasando por el mango alimenta al rodillo. Estos rodillos se pueden encontrar de 15 a 35 cm. de ancho. Aún cuando se aumenta la rapidez de aplicación por

este método, el espesor resultante no es del todo uniforme, tiende a ser algo más delgado y más poroso debido a las pequeñas cantidades que el rodillo puede depositar en la película, y solamente tiene éxito en superficies planas en el sentido del eje del rodillo.

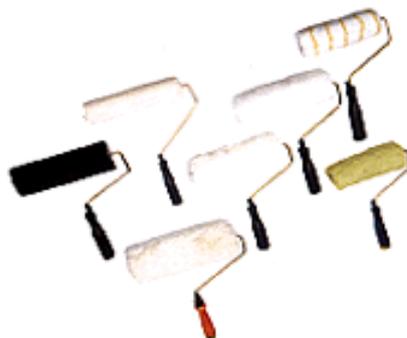


Figura 2.12. Rodillos para pintado.

2.4.2.2 Aplicación por aspersión.

Este método de aplicación se desarrolló, ante la necesidad de aumentar las velocidades de aplicación y mejorar el control de espesores y eficiencia en general, a consecuencia de las grandes áreas por recubrir y por la agresividad de los medios corrosivos que se presentan en la industria.

El principio fundamental de la aplicación por aspersión, está basado en la fina atomización del recubrimiento, proyectando la niebla resultante hacia el objeto por recubrir. Los primeros equipos de aspersión utilizaron aire comprimido como medio de atomización y no obstante que a la fecha es el procedimiento más utilizado, se han desarrollado otros métodos de aspersión tales como aspersión electrostática, aspersión en caliente, aspersión por vapor y aspersión sin aire, pero su alto costo y dificultad de manejo han limitado su popularización.

El equipo de aplicación por aspersión por aire considera los siguientes componentes: pistola de aspersión, recipientes de material, mangueras, filtros de aire, reguladores de presión de aire, compresores de aire y equipos de seguridad. La pistola de aspersión es el principal componente de este sistema de aplicación.

a) Equipo de aspersión.

Hay dos métodos para transportar el fluido a la pistola: con aire y sin el. En el primero, puede ser por alimentación, por succión o por alimentación por presión; en el segundo la aspersión se produce forzando el material por alta presión a través de un orificio en la pistola. El aire usado deber estar seco y libre de aceite y contaminantes.

Este dispositivo esta diseñado de manera tal que permite mezclar íntimamente y en la proporción adecuada, una corriente de aire comprimido con una cierta cantidad de recubrimiento, provocando su atomización, y con la facultad de dirigir la niebla con una forma o un patrón determinado hacia una superficie por recubrir. El aire y el material entran a la pistola por conductos diferentes.

Considerando el lugar donde se produce la mezcla aire-recubrimiento, las pistolas se clasifican en pistolas de mezcla exterior y pistolas de mezcla interior.

1.-Pistolas de mezcla exterior: Aquí la mezcla tiene lugar inmediatamente después de la salida de materiales del frente o casquillo de la pistola; este tipo es adecuado para aplicar casi cualquier tipo de material fluido, e incluso el único que puede aplicar materiales de secado rápido.

2.-Pistolas de mezcla interior: En el segundo tipo, la mezcla se realiza en el casquillo, un poco antes de que los materiales abandonen la pistola; su uso está relegado a situaciones donde sólo se cuenta con el aire de baja presión.



Figura 2.13. Pistolas de aspersión.

2.4.2.3 Aplicación con spray.

a) Spray convencional.

El equipo de spray convencional utiliza (en comparación con el spray sin aire) presiones bajas para esparcir pintura atomizada sobre la superficie preparada. A continuación se describe una unidad convencional de spray:

La pintura es arrastrada (succionada) por una presión de alrededor de 20 a 60 psi, a la cabeza del spray. Esta cabeza del spray obliga al material a pasar a través de un orificio estrecho donde es entonces mezclado con un flujo dual de aire. La fuerza del aire que entra en la corriente de pintura produce atomización fina del material, el cual se sienta suavemente sobre la superficie a ser revestida.

b) Spray sin aire.

La aplicación de spray sin aire difiere de la convencional en varios aspectos importantes:

- La cantidad de revestimiento esparcida a la superficie puede ser de hecho muy alta, constituyendo una operación rápida en estructuras o tuberías grandes.
- La pintura se esparce desde un recipiente, después de haber sido succionada a una bomba neumática. Esta bomba es normalmente del tipo de presión operacional.
- El pistón de la bomba es impulsado hacia arriba y hacia abajo, extrayendo pintura hacia una cámara de compresión y esparciéndola después a una presión mayor.

- La presión normal de aire que impulsa la bomba será alrededor de 80 a 100 psi.
- La fuerza de la pintura que se esparce a través de un orificio estrecho, forma una llovizna de gotitas. Este proceso no requiere atomización del aire.

Capítulo III

Sistemas de protección anticorrosiva con protección catódica.

3.1 Protección catódica.

3.1.1 Generalidades, principio y fundamento de la protección catódica.

Los antecedentes de las técnicas de protección catódica se remontan al descubrimiento del galvanizado o zincado, patentado en Francia en 1876 y luego en Inglaterra en 1836¹. Se sabe también que aproximadamente en el año 1824 la protección catódica presenta sus primeros avances gracias a la labor de Sir. Humphrey Davy quien además sentó las bases del sistema. Por ese mismo año, dicho estudioso recomienda la protección del cobre de las embarcaciones uniéndolo con el hierro o zinc al obtener una apreciable reducción del ataque al cobre, sin embargo, debido a los inconvenientes suscitados por la proliferación de organismos marinos se rechazó el sistema de protección catódica ya que estos problemas reincidían directamente en la navegación. En 1850 y después de un largo período de estancamiento, la marina canadiense, mediante el empleo adecuado de pinturas con sustancias, antiorganismos y anticorrosivos, demostró que económicamente era factible el uso de la protección

¹ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. “*Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano*”. Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. 25 pp.

catódica en embarcaciones, pues se redujeron costos de proceso y mantenimiento. No obstante, fue a partir de 1910, que tanto Estados Unidos como Inglaterra, efectuaron las primeras aplicaciones por corriente impresa en estructuras enterradas. A partir de este momento, ésta tecnología ha ido evolucionando lentamente, poniendo énfasis en la aplicación de materiales anticorrosivos y en la implementación de los sistemas de protección, quedando todavía un amplio campo de exploración alrededor de los parámetros o factores del entorno, como son las resistividades, el pH, las temperaturas, las corrientes erráticas, que cada vez más se vienen tomando en cuenta.

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, que está siendo usada con mayor éxito en el mundo entero. Esto se debe a que cada vez más se hacen necesarias nuevas instalaciones que debido a sus condiciones de operación, requieren de una integridad absoluta. A continuación mencionaré algunos objetivos de aplicación frecuente de esta técnica:

- Exterior de tanques metálicos enterrados o sumergidos, contenedores de cualquier producto como gas, agua, combustibles, productos químicos, etc.
- Exterior de tuberías metálicas enterradas o sumergidas, que conduzcan cualquier tipo de fluido o producto sólido, líquido o gaseoso.
- Fondo exterior de tanques apoyados en el suelo o sobre el agua, que contengan cualquier producto.
- Exterior de estructuras metálicas de sustentación, enterradas o sumergidas. Entre éstas estarían pantalanés, muelles, plataformas petrolíferas flotantes o fijas, torres, etc.
- Exterior de barcos y construcciones metálicas relacionados con la navegación, como boyas, diques flotantes, etc, parcialmente sumergidos, tanto para agua marina como dulce.
- Estructuras de hormigón armado con ataque por corrosión, tanto enterradas, sumergidas o aéreas, como el caso de puentes, muelles, edificios, etc.
- Interior de tanques y tuberías metálicas que contengan o conduzcan un producto conductor, como el agua marina, dulce, fría o caliente, para todo tipo de aplicaciones industriales y domésticas. Algunos ejemplos, pueden ser el interior de calderas, acumuladores, tanques de reserva de agua, parte baja de tanques de combustible, cubas, decantadores, etc.
- Elementos enterrados o sumergidos de sistemas eléctricos y telefónicos, como las armaduras de cables, puestas a tierra, etc.

Según los puntos anteriormente mencionados, podemos decir que la protección catódica constituye sin duda, el más importante de todos los métodos empleados para prevenir la corrosión, de estructuras metálicas enterradas en cualquiera de los distintos tipos de suelos o sumergidas en medios acuosos. Tanto el acero, como el cobre, plomo, latón, aluminio, aceros inoxidable y bronce, son algunos de los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método. También mediante ésta técnica, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones, corrosión intergranular, picaduras o ataques generalizados. No se puede emplear para evitar la corrosión en áreas de metal que no están en contacto con un electrolito.

La Protección Catódica es un método electroquímico, que se usa para eliminar o mitigar la corrosión de los metales inmersos en un electrolito. Este nombre se da, porque el metal a proteger es obligado a comportarse como cátodo, es decir, en donde se lleva a

cabo la reacción de reducción. Debido a ciertas condiciones específicas de pH y de potencial, se crean zonas activas o pasivas en el acero².

El propósito primordial de la protección catódica, es proveer al metal de los electrones que pierde, debido al proceso de oxidación. El suministro de los electrones se puede realizar por dos vías: corriente impresa y por ánodos de sacrificio (se verá más adelante).

La protección catódica, teóricamente se basa en ubicar al potencial del acero enterrado y/o sumergido, dentro de la zona de inmunidad, en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o de Potencial-pH, más conocido como diagrama de *Pourbaix* (ver Figura 3.1).

Si consideramos el diagrama de *Pourbaix* para el caso del hierro (acero), en éste se pueden observar, las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad. Para pasar el hierro a la zona de inmunidad, hay que rebajar su potencial a un valor de -0.62 V con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno, que equivale a -0.80 V con respecto al Ag/AgCl y -0.85 V con respecto al Cu/CuSO₄. Esta será, pues otra definición de la protección catódica. La densidad de corriente que será necesaria aplicar para conseguir rebajar el potencial de la estructura a proteger, al valor señalado (-0.80 V), es un dato de gran valor ya que influirá directamente en la economía del sistema³.

Desde el punto de vista cinético, en un sistema cualquiera, en el lugar donde se está desarrollando la corrosión existe un balance perfecto entre las reacciones anódicas y catódicas sobre la superficie del metal⁴.

Si incrementamos un flujo de electrones (corriente) de forma gradual, mediante un circuito externo sobre el metal que se corroe, la polarización del cátodo continuará. Esta polarización comenzará con un potencial de corrosión de circuito abierto (**E_{cor}**), en el camino la corriente ofrecerá una protección parcial con un potencial de corrosión igual a **E'_{cor}** y corriente **i'_{cor}** igual a b-a (según la curva de oxidación o anódica). Por tanto, se tendrá una corriente de protección (**i_{prot}**) equivalente a la corriente c-b (según la curva de reducción o catódica). En el gráfico de la figura 3.2 podemos observar el diagrama de *Evans-Tafel* en donde se utiliza el logaritmo de la corriente, el que demuestra que la corriente de protección (tramo c-b), es mayor que la corriente de corrosión (tramo b-a). Cuando la corriente aplicada es incrementada, hasta que el potencial catódico **E_p** alcance un valor igual o inferior al potencial de circuito abierto del ánodo **E_a**, habrá un estado equipotencial; no habrá ninguna distinción entre los sitios anódicos y catódicos locales, la corriente de corrosión llega a ser cero, por tanto, ésta se detiene, es decir, la reacción anódica en el metal se anula siendo “**i_{ap}**” (p-a) la corriente catódica que tendrá que ser suministrada por el sistema de protección catódica.

² Torres Acosta A, A.; Martínez Madrid, M. (2001). “*Vida Remanente de Estructuras de Concreto en Ambiente Marino*”. Resúmenes Colloquia 2001, Madrid España, 23 al 24 de abril de 2001.

³ Guillen Rodrigo, Miguel Ángel. “*Protección Catódica de Sondeos de Captación de Agua*”, ITGE, Madrid, 1999. 149 pp.

⁴ Alméstar Mauricio, Jorge Reynaldo. “*Simulación de curvas equipotenciales en protección catódica mediante el uso de Algor Electrostat*”. Tesis (Titulado en Ingeniería Mecánica-Eléctrica). Piura: Universidad de Piura, 2004. 22 pp.

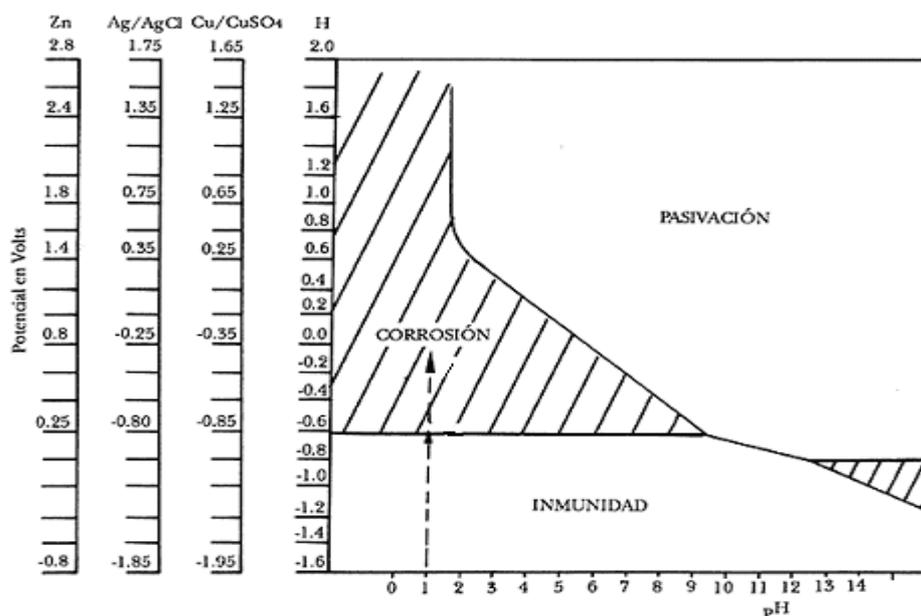


Figura 3.1. Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe)⁵.

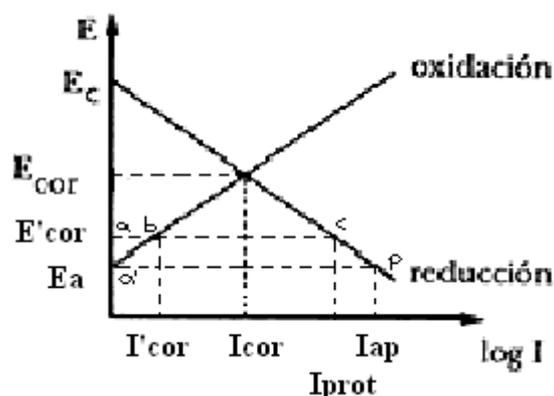


Figura 3.2. Diagrama de Evans-Tafel (polarización) mostrando el principio de la protección catódica.

3.1.2 Criterios para la protección catódica.

3.1.2.1 Potencial estructura/electrolito mínimo permisible.

Se han empleado algunos criterios para determinar si una estructura está protegida o no de la corrosión. La Asociación Nacional de Ingenieros en Corrosión (NACE) y el Comité de Normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios (PEMEX), especifican algunos criterios que son importantes para determinar cuándo, una estructura de acero está siendo protegida catódicamente, entre los que tenemos:

1. Un potencial estructura-electrolito (catódico) mínimo de -0.850 V, medido respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ saturado (SCS), ver diagrama de *Pourbaix*. La determinación de este voltaje debe hacerse con la corriente de protección aplicada⁶.

⁵ Alméstar Mauricio, Jorge Reynaldo. *op. cit.*

2. Un cambio de potencial estructura-suelo mínimo de -0.300 V producido por la aplicación de la corriente de protección. El cambio de potencial se mide respecto al electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre. La determinación de este potencial debe efectuarse con la corriente de protección aplicada. Este criterio se aplica a estructuras que no están en contacto con metales disímiles⁷.
3. Un potencial de protección estructura-electrolito (catódico) de -0.950 V, medido respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ saturado(SCS), cuando el área circundante de la estructura se encuentre en condiciones anaeróbicas, y estén presentes microorganismos asociados al fenómeno de corrosión, como las bacterias sulfato-reductoras⁸.
4. Un desplazamiento del Ecor de 100 mV en dirección negativa, determinado por la interrupción de la corriente, y eliminando la caída óhmica; es decir, un cambio de potencial de polarización mínimo de -0.100 V medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito⁹. Este cambio de potencial de polarización, debe determinarse interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el abatimiento de la polarización. Al interrumpir la corriente, ocurre un cambio inmediato de potencial. La lectura del potencial después del cambio inmediato, debe usarse como base de la lectura a partir de la cual, se mide el abatimiento de la polarización.
5. Un voltaje al menos más negativo que el establecido, en donde comienza el comportamiento de *Tafel* de la curva $E-\log I^{10}$.

El primer criterio es el más usado, aunque muchas veces representa sobreprotección. Es más práctico y económico para ser empleado en estructuras revestidas.

El segundo criterio, es más aplicable para estructuras desnudas o pobremente revestidas.

El tercer criterio, se utiliza en algunas situaciones en donde se tenga la sospecha de actividad microbiológica en el medio ambiente y ésta sea confirmada.

La aplicación del cuarto criterio, ocupa demasiado tiempo y requiere interruptores sincronizados; pero es uno de los más seguros para determinar la protección de una estructura metálica, ya que no está afectado por la caída óhmica en el electrolito.

El último criterio es raramente usado, pues requiere técnicas y equipos especiales. La precisión de los datos que arroja son los más confiables debido a los equipos especiales usados.

⁶ NACE Standard, (1999). “*Standard Recommended Practice RP-090-90: Cathodic Protection of Reinforcing steel in Atmospherically Exposed Concrete Structures*”. National Association of Corrosion engineers, Houston, Texas, USA.

⁷ Pemex CID-NOR-N-SI-0001. “*Requisitos mínimos de seguridad para el diseño, construcción, operación, mantenimiento e inspección de ductos de transporte*”. 14-Agosto-1998. 229 pp.<en línea> <http://www.cre.gob.mx/registro/permisos/gas/Anexos/061tra99x/f.pdf>

⁸ Pemex PROY-NRF-047-PEMEX-2002. “*Diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de protección catódica*”. 11 pp. <en línea> <http://www.pemex.com/files/standards/definitivas/nrf-047-pemex-2002.pdf>

⁹ NACE Standard, (1999). *art. cit.*

¹⁰ *Ibidem.*

La selección del criterio más conveniente está en función de cada sistema y del tipo de corrosión considerada, así como de la facilidad de aplicación.

De acuerdo con la norma ASTM 876-91, el criterio para determinar si una estructura presenta corrosión, es el que presenta la siguiente tabla:

Tabla 3.1. Criterio para determinar si una estructura metálica enterrada, presenta corrosión en suelo neutro¹¹.

Ecor (mV vs. SCS)	Probabilidad de corrosión
> -270	10% de que no suceda.
-270 < Ecor < -350	Incierta.
< -350	90% que suceda.

El criterio de protección de la polarización a 100 mV, resultó de investigaciones empíricas. Los autores aplicaron la teoría de la interrupción de la corriente, y recomiendan procedimientos para la medida del potencial, *Instant off* (medir el potencial 15 segundos después de desconectar el sistema), investigando también los efectos de la temperatura, potencial estático y la densidad de corriente. Este criterio se cumple cuando el acero se despolariza a una cantidad mínima de 100 mV en dirección negativa al interrumpir la corriente protectora. Esta caída de potencial se monitorea contra un electrodo de referencia estable, por un período de 2 a 8 horas¹². Cuando la corriente se interrumpe, hay un cambio inmediato en el voltaje, resultado de la eliminación de la caída óhmica o también llamada IR, y no debe de incluirse en las medidas de caída de potencial. La lectura inicial del potencial de despolarización se tomará después de que la caída óhmica sea eliminada¹³.

El criterio de E-log I también se ha revisado críticamente y se puede afirmar, que el procedimiento e interpretación están bien descritos, aunque no se puede decir lo mismo de los equipos de ensayo. Sólo los efectos de variables no controladas, tales como el entorno de la estructura, temperatura y contenido de humedad, pueden disminuir la efectividad de este criterio. Se ha observado que la densidad de corriente establecida por el ensayo E-log I, es generalmente más alta que el requerido para alcanzar los 100 mV de polarización.

Otro de los criterios, sugiere alcanzar y mantener la polarización con potenciales específicos tales como -700 mV o -850 mV. La aplicación de tales criterios, ha encontrado como resultado, que hay un alto e innecesario requerimiento de corriente. Esto puede causar cierto daño prematuro al ánodo y a la propia estructura.

3.1.2.2 Potencial estructura/electrolito máximo permisible.

Este valor, se fijará de acuerdo a las características particulares del recubrimiento anticorrosivo dieléctrico aplicado sobre la tubería. No debe exceder al potencial que produzca el desprendimiento del recubrimiento, ni tampoco a valores de potencial más negativos que originen problemas colaterales. Tomando en cuenta estas consideraciones, la mayoría de la bibliografía consultada sugieren un máximo potencial

¹¹ ASTM 876-91.

¹² NACE Standard, (1999). *art. cit.*

¹³ *Ibíd.*

de protección que pueda estar ubicado entre los -1200 mV a -1300 mV, sin embargo esto depende también de la resistencia del recubrimiento frente al desprendimiento catódico, pues se ha llegado a tener un potencial de -1500mV en algunas ocasiones.

Tabla 3.2. Potencial de protección para el hierro y acero para cada electrodo de referencia y tipo de ambiente¹⁴.

Ambiente	Electrodo de referencia (condiciones de uso)	
	Cobre/sulfato de cobre (en suelos y agua dulce)	Plata/cloruro de plata (en agua de mar)
Ambiente aeróbico	-0.850 volts	-0.800 volts
Ambiente anaeróbico	-0.950 volts	-0.900 volts

3.1.3 Criterios para el diseño de protección catódica en estructuras enterradas y sumergidas.

Para que la protección catódica sea efectiva y eficiente, se debe tener en cuenta:

- Seleccionar el sistema más adecuado para cada caso particular.
- Cada sistema debe proporcionar una corriente eléctrica suficiente.
- Buscar una distribución uniforme de la corriente eléctrica en la estructura por proteger.
- Evitar interferencias y daños en las partes donde haya recubrimiento anticorrosivo.
- El diseño del sistema de protección debe hacerse en función de la vida útil de la estructura.

En el caso que las estructuras correspondieran a un sistema de tuberías, se debe considerar además:

- Las tuberías de acero deben contar con un sistema de protección catódica definitivo, en un plazo no mayor a un año posterior a la terminación de su construcción.
- Mientras se está construyendo el sistema de tuberías, en todos los casos se debe instalar un sistema de protección catódica provisional.
- Las estructuras y tuberías submarinas deben contar con un sistema de protección catódica permanente, instalado simultáneamente en la fase de construcción.

Existe información mínima necesaria para el diseño de un sistema de protección catódica en el caso de tuberías enterradas y/o sumergidas, la misma que se clasifica de la siguiente manera ¹⁵:

- a) Planos de trazo y perfil, cartas geográficas (en estructuras marinas).
- b) Fecha de construcción de la estructura
- c) Especificaciones de la tubería, conexiones y otros accesorios.
- d) Tipo y calidad del recubrimiento anticorrosivo dieléctrico.

¹⁴ Pemex PROY-NRF-047-PEMEX-2002. art. cit.

¹⁵ Pemex PROY-NRF-047-PEMEX-2002. art. cit.

- e) Instalaciones adyacentes, cruces entre tuberías e interconexiones.
- f) Cruces encamisados (riesgo de apantallamiento).
- g) Aislamientos eléctricos.
- h) Puentes eléctricos.
- i) Requisitos de seguridad.
- j) Cruces aéreos y subfluviales.
- k) Temperatura de operación de la tubería.
- l) Sistemas de protección catódica existentes o propuestos.
- m) Posibles fuentes de interferencia.
- n) Condiciones especiales del ambiente
- o) Estructuras metálicas enterradas vecinas.
- p) Accesibilidad a las áreas de trabajo.
- q) Disponibilidad de energía eléctrica.
- r) Factibilidad de aislamiento eléctrico de las estructuras vecinas.
- s) Corrientes de agua.
- t) Uso y ocupación del suelo (derecho de paso).
- u) Pruebas de requerimiento de corriente y número total de puntos de drenaje.
- v) Perfil de resistividad del electrolito
- w) Estadística de fallas de la tubería.
- x) Perfil de potenciales estructura-electrolito.
- y) Análisis físico-químicos y microbiológicos del electrolito.

3.1.4 Tipos de protección catódica.

- a) Por ánodos de sacrificio.

El método se basa en la diferencia que existe en el potencial electroquímico de los metales¹⁶. Se fundamenta en el mismo principio de la corrosión galvánica, en la que un metal más activo es anódico por lo que su potencial de reducción es menor con respecto a otro más noble que se desea proteger. Es así que, por un simple efecto de pila galvánica, se obtiene la protección de dicho elemento lo que permite que se corra o sacrifique el metal anódico.

Si tenemos en cuenta la serie electroquímica de los metales¹⁷, apreciamos que un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. La protección de las tuberías de acero enterradas y/o sumergidas, se logra aprovechando la mayor diferencia de potencial de los elementos que son más anódicos que el Fe (hierro) en la serie. Así por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al zinc.

Para realizar un sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio en tuberías enterradas y/o sumergidas, se debe conectar eléctricamente la tubería de acero con otro metal dentro del electrolito, favoreciendo la reacción de oxidación del metal más activo, que aporte así los electrones al acero obligándolo a establecer una reacción de reducción y así mantenerse en estado de oxidación cero.

¹⁶ Fontana M., G. "Corrosion engineering." 3ra Ed., (New York, New York, USA: Mc Graw Hill, 1986). 556 pp.

¹⁷ Cfr. Apéndice A.

La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la tubería a proteger, es de bajo valor porque este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, en pequeñas estructuras y en medios de baja resistividad¹⁸.

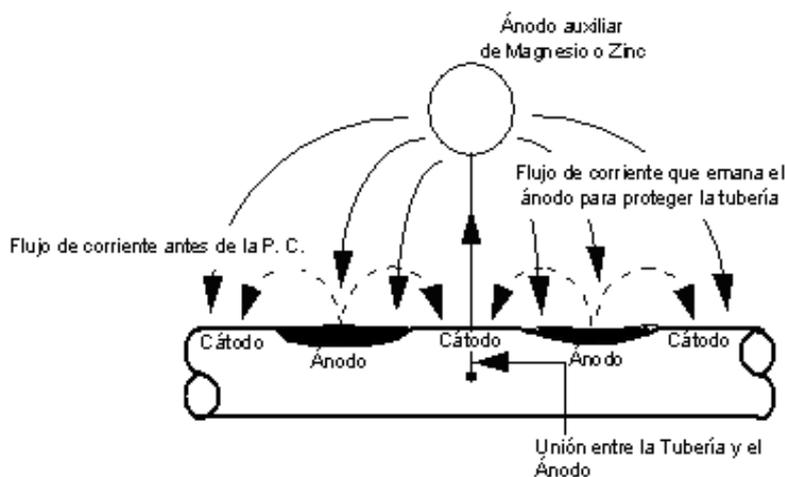


Figura 3.3. Tubería de acero al carbono protegida por un ánodo auxiliar¹⁹.

I.- Ventajas de usar ánodos galvánicos como protección:

- Fácil instalación.
- No se necesita de una fuente de corriente continua ni de regulador de voltaje.
- No origina problemas de interferencia.
- Su costo de mantenimiento es bajo.
- Permite obtener una distribución de corriente uniforme.
- Se puede aumentar el número de ánodos con el sistema operando.

II.- Desventajas de usar ánodos galvánicos como protección:

- La corriente que suministra el sistema es limitada.
- Ineficaz en ambientes de alta resistividad.
- El costo inicial es alto, en el caso de grandes estructuras.
- Alto consumo de ánodos para estructuras enterradas mal revestidas y sin revestimiento, en agua de mar.

a.1) Características y tipos de ánodo de sacrificio.

Las características que debe tener un ánodo de sacrificio, son las siguientes:

- Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo, como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente se protege) a -0.80 V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo, ya que esto

¹⁸ González, Oscar. "Corrosión". 1997. <en línea>

<http://www.monografias.com/trabajos3/corrosion/corrosion.shtml>

¹⁹ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión". 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm

motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0.95 V y -1.7 V.

- El metal que actúa como ánodo, tendrá que presentar una tendencia muy pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras, y deberá tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperios-hora por kg de material consumido (A-h/kg.), lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.
- En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- El metal debe ser de fácil adquisición, y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
- El metal deberá tener un costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por amperio-año.

Estas exigencias, ponen de manifiesto que sólo el magnesio, el zinc, y el aluminio con sus respectivas aleaciones, pueden ser considerados como materiales para ser utilizados prácticamente como ánodos de sacrificio²⁰.

I.-Magnesio: Los ánodos de magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Están diseñados para obtener el máximo rendimiento posible, en su función de protección catódica. Los ánodos de magnesio son apropiados para oleoductos, pozos, tanques de almacenamiento de agua, incluso para cualquier estructura que requiera protección catódica temporal. Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelos de baja resistividad hasta 3000 ohmio-cm.

II.-Zinc: Se emplea en la protección de estructuras metálicas inmersas en agua de mar, o en suelos con resistividad eléctrica de hasta 1000 ohm-cm.

III.-Aluminio: Se emplea en la protección de estructuras inmersas en agua de mar.

Tabla 3.3. Características importantes de los ánodos más usados²¹.

<i>Material Anódico</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Rendimiento A-hr/kg</i>	<i>Contenido de energía A-hr/kg</i>	<i>Potencial de trabajo (voltio)</i>	<i>Relleno</i>
<i>Zinc</i>	95%	778	820	-1.10	50% yeso; 50% bentonita
<i>Magnesio</i>	95%	1102	2204	-1.45 a -1.70	75% yeso; 20% bentonita; 5% sulfato de sodio.
<i>Aluminio</i>	95%	2817	2965	-1.10	Ninguno

²⁰Ibidem

²¹ González, Oscar. *art. cit.*

a.2) Relleno *Backfill*.

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos, entre ellos, el de *backfill* especialmente con ánodos de zinc y magnesio²². Estos productos químicos rodean completamente el ánodo, produciendo algunos beneficios como:

- Promover mayor eficiencia, disminuyendo la corrosión espontánea y consiguiendo un ataque del ánodo uniforme.
- Desgaste homogéneo del ánodo, estabiliza su potencial, evita la polarización y asegurar una fuente segura de corriente.
- Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo.
- Absorben humedad del suelo manteniendo dicha humedad permanente.

La composición típica del *backfill* para ánodos galvánicos, está constituida por yeso (CaSO_4), bentonita, sulfato de sodio, y la resistividad de la mezcla varía entre 50 a 250 ohm-cm.

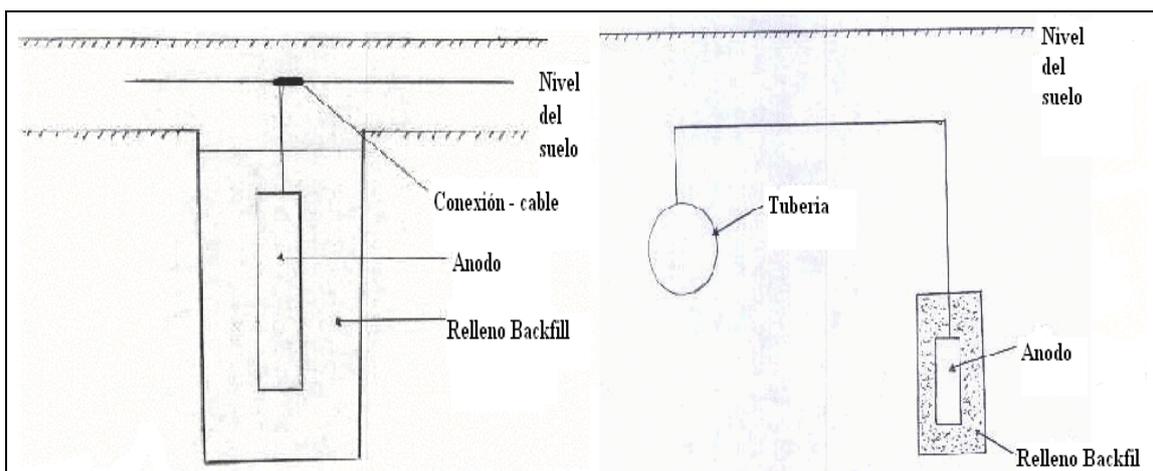


Figura 3.4. Diseño de instalación para ánodo galvánico con relleno Backfill²³.

b) Por corriente impresa.

El sistema de protección catódica que mejor se adapta a todo tipo de instalaciones, es el llamado por corriente impresa. El sistema de protección catódica con corriente impresa, se llevó a cabo aproximadamente cien años después que aquel con ánodos galvánicos. Los componentes de un sistema de protección catódica con corriente impresa son:

- Un ánodo dispersor (electrodo auxiliar)
- Una fuente de corriente continua (pura o rectificada)
- El cable portador de la corriente.

²² Cfr. Tabla 3.3.

²³ González, Oscar. *art. cit.*

En este tipo de protección, para que la estructura metálica a proteger se mantenga en un estado pasivo o inmune²⁴, deberá ser conectada al polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua; mientras que el polo positivo se conecta a un electrodo auxiliar que puede ser un lecho de ánodos (horizontal, vertical o profundo), ubicado en las proximidades de dicha estructura, el cual cierra el circuito. Las conexiones se harán por medio de un cable portador de corriente como se muestra en la figura 3.5. Cuando las zonas catódicas de la estructura son polarizadas por la corriente externa, se igualan al potencial del ánodo a circuito abierto, por tanto, toda la superficie de la estructura metálica estará al mismo potencial y no habrá más corrosión. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo), el cual completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico. La dispersión de la corriente eléctrica en el electrolito, se efectúa mediante la ayuda de ánodos inertes, cuyas características y aplicación dependen del electrolito.

Este tipo de sistema es el que se utiliza de forma más común en diversos estilos de estructuras, como aquellas enterradas y/o sumergidas y en estructuras de concreto, ya que la elevada resistividad en estos sistemas puede vencerse mediante el uso de generadores eléctricos de potencia regulable. Es por ello que, actualmente numerosas estructuras cuentan con este tipo de protección aún en condiciones ambientales adversas. Sin embargo, su uso implica una instalación inicial costosa, por requerir rectificadores de corriente y un sistema de monitoreo continuo, aunque resulta ser el más efectivo.

Es necesario el mayor cuidado en las instalaciones realizadas, y una exigencia de alta calidad en los aislamientos de cables de interconexión.

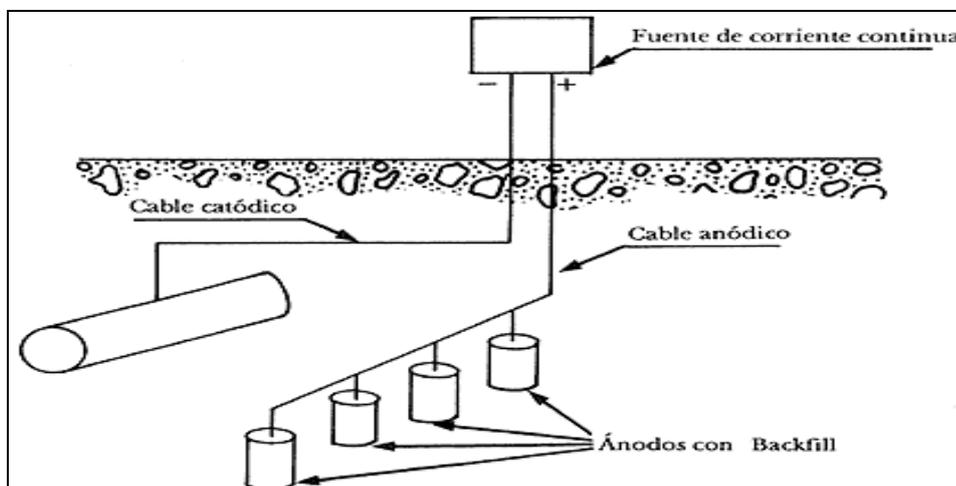


Figura 3.5. Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada²⁵.

²⁴ Fontana M., G. *op. cit.*

²⁵ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. "Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión". 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm

I.- Las ventajas del uso de la corriente impresa son:

- La posibilidad de tener tensiones altas, para proteger grandes superficies incluso no recubiertas, y en medios de altas resistividades.
- Potencial y corriente variables, además de tomar un gran intervalo en cada una.
- La necesidad comparada de menor número de ánodos.
- Pueden controlarse las prestaciones del sistema, ajustando la tensión o corriente de salida.
- Con el uso de sistemas automáticos, se garantiza una correcta protección y nunca sobreprotección, pudiéndose además enviar controles del funcionamiento del sistema, mediante comunicaciones específicas (digitales, analógicas, radio).
- La centralización del lecho de ánodos facilita la instalación y los trabajos suplementarios.
- Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.
- Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas.
- Permiten un mayor control y seguimiento de la protección, incluso permite almacenar medidas periódicas de forma automática al incorporar procesos informáticos.

II.- Por otro lado, las mayores desventajas, radican en:

- La necesidad de una fuente de energía externa.
- Requiere de una fuente de corriente continua.
- Puede causar problemas de interferencia.
- La posibilidad de sobreprotección, y los daños que ésta pueda ocasionar cuando el sistema está mal ajustado, aparte de problemas de fragilización por acción del hidrógeno.
- La dificultad de obtener una distribución uniforme en elementos de formas complejas.
- El riesgo de una corrosión acelerada por corrientes vagabundas, sobre la conexión del polo negativo a la estructura, si esta se destruye.
- Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento.
- Tiene un costo elevado.

El factor económico será en muchos casos el determinante, para elegir el tipo de instalación a emplear; y por tanto, de la rentabilidad de dicha inversión.

b.1) Ánodos utilizados en corriente impresa.

I.- Chatarra de hierro: Por su economía, es utilizada con frecuencia como electrodo dispersor de corriente. Este tipo de ánodo puede ser aconsejable para ser utilizado en terrenos de resistividad elevada, y es aconsejable se rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque con un diámetro medio de partícula de 10 mm. El consumo medio de estos lechos de dispersión de corriente, es de 9 Kg/A-Año²⁶.

II.- Ferrosilicio: Este ánodo es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca en el suelo hincado o tumbado, rodeado de un relleno de carbón de coque. A

²⁶ González, Oscar. *art. cit.*

intensidades de corriente baja (1 amperio), su vida es prácticamente ilimitada, siendo su capacidad máxima de salida de corriente de unos 12 a 15 amperios por ánodo. Su consumo oscila a intensidades de corriente altas, entre 0.5 a 0.9 Kg/A-Año. Su dimensión más común, es la correspondiente a 1500 mm de longitud y 75 mm de diámetro, y su peso es aproximadamente de 60Kg. El ferrosilicio es muy frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser de cuidado²⁷.

III.- Grafito: Puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, y se utiliza con relleno de grafito o carbón de coque. Es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser de cuidado. Sus dimensiones son variables, su longitud oscila entre 1000-2000 mm, y su diámetro entre 60-100 mm, son más ligeros de peso que aquellos de ferrosilicio. La salida máxima de corriente es de 3 a 4 amperios por ánodo, y su desgaste oscila entre 0.5 y 1 Kg/A-Año²⁸.

IV.- Titanio-Platinado: Este material está especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque sea perfectamente utilizado en agua dulce o incluso en suelo. Su característica más relevante es que a pequeños voltajes (12 V), se pueden sacar intensidades de corriente elevadas, siendo su desgaste imperceptible. En agua de mar, tiene sin embargo, limitaciones en la tensión a aplicar que nunca puede pasar de 12 V, ya que a tensiones más elevadas podrían ocasionar el desprendimiento de la capa de platino, y por lo tanto, se origina el deterioro del ánodo. En aguas dulces libres de cloruros, estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m², y su desgaste en las condiciones más adversas es de 0.01 g/A-año.

Su forma es diversa, pueden estar hechos en forma de una barra maciza, de tubo, chapa, alambre, entre otras. El platinado puede ser continuo o a intervalos, según las necesidades, y los espesores de platino pueden ser de 2.5 y 5 micras. La vida de los ánodos con 2.5 micras de espesor de platino, se estima en aproximadamente 10 años y, los de 5 micras duran entre 20 y 25 años. Su resistencia mecánica es pequeña y se deterioran por simple abrasión²⁹.

V.- Tántalo platinado: El ánodo de tántalo platinado es semejante al anterior, aunque sobre aquél tiene la ventaja de que en agua de mar, puede trabajar a tensiones altas (50-60 V), sin embargo, su adquisición es menos fácil, y su precio es más elevado. Dado que en agua de mar y a voltajes bajos se consiguen grandes intensidades de corriente, el uso de este ánodo, en general, no se justifica del todo³⁰.

VI.- Plomo-plata: La aleación plomo plata está constituida por 1% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente posee un color a cacao, y propiedades mucho más elevadas en virtud de los elementos de aleación, que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo. Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima de salida no pueda ser superior a 270 A/m². Se consume a razón de 50 a 200 g/A-año.

²⁷ *Ibíd.*

²⁸ *Ibíd.*

²⁹ González, Oscar. *art. cit.*

³⁰ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión*”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm

Estos ánodos, deben presentar una superficie plana; con lo cual se evitan en lo posible las aristas, pues en estas zonas la capa de peróxido de plomo se forma mal o no se forma, por lo que en estos puntos se puede presentar una fuerte corrosión³¹.

VII.- Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio: Estos ánodos, desarrollados en Estados Unidos en 1968, están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C). Como resultado, se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia, y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente (1100 A/m²), lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es aproximadamente 20% menor³².

b.2) Fuentes de corriente.

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente, al menos durante diez años.

I.-Rectificadores:

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido, se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna, para luego transformarla en corriente continua de bajo voltaje mediante diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio, y con la ayuda de sistemas de adecuación regulable manual y/o automática, a fin de regular las características de la corriente según las necesidades del sistema a proteger. En la figura 3.6 se muestra que, si se trata de un rectificador monofásico estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 o 220 V (tensión de la red de distribución). Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también es más frágil que el silicio.

³¹ *Ibidem.*

³² *Ibidem.*

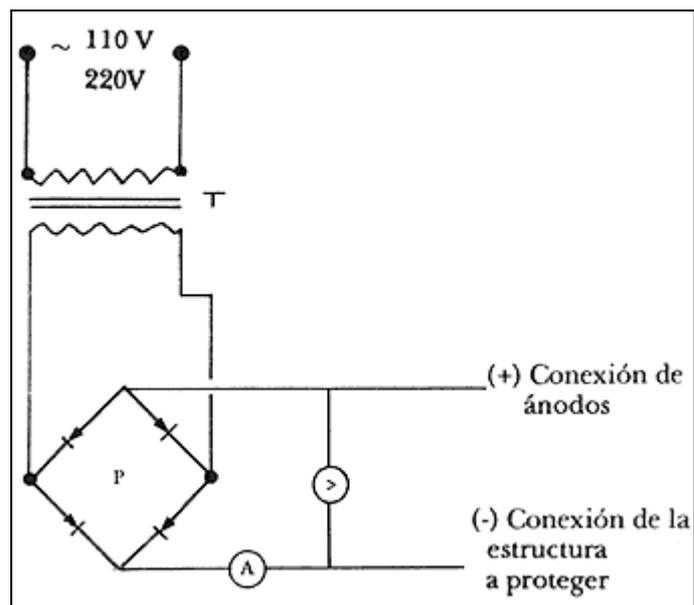


Figura 3.6. Esquema de un transformador rectificador monofásico³³.

La fuente de c.c. posee dos robustos bornes de salida que, permiten las conexiones con la estructura a proteger (borne negativo) y con el electrodo auxiliar (borne positivo), denominado comúnmente “*ground-bed*” o dispersor superficial.

El “*ground-bed*” es una toma de tierra destinada a drenar la corriente proveniente de la estructura a proteger. Su eficiencia será tanto mayor cuanto menor sea la resistividad del electrolito (suelo o agua), en el lugar de su instalación y, cuanto mayor sea la conductividad de los elementos de sacrificio utilizados.

Para el conocimiento de la resistividad del electrolito, se debe realizar previamente una medición mediante instrumental especializado en el lugar donde se piensa instalar el “*ground-bed*”.

Los materiales componentes del electrodo auxiliar o “*ground-bed*”, experimentaron una evolución técnica. Inicialmente se utilizaron chatarra de hierro, rieles, electrodos de grafito y más recientemente, se difundió la aplicación de electrodos de corriente impresa de alto contenido de hierro-silicio en diferentes tipos de aleación, por su elevadísima eficiencia respecto de los anteriores. Cualquiera sea el material del “*ground-bed*” a utilizar, una vez instalado, es conveniente obtener una resistencia respecto al medio de 1 ohm ó menor.

Las condiciones que el diseñador debe estimar para escoger un rectificador son:

- Características de la corriente alterna disponible en el área (voltios, ciclos, fases).
- Requerimiento máximo de salida (amperios y voltios).
- Sistemas de montaje: sobre el piso, empotrado en pared, en un poste.
- Tipos de elementos de rectificación: selenio, silicio.

³³ Ávila Mendoza, Javier; Genésca Llongueras, Joan. “*Más allá de la Herrumbre II: La lucha contra la corrosión*”. 1989, Fondo de Cultura Económica, serie La Ciencia desde México, No. 79. México. <en línea> http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm

- Máxima temperatura de operación.
- Sistema de seguridad: alarma, *breaker*, etc.;
- Instrumentación: voltímetros, permiten controlar la tensión de salida y, amperímetros, que permiten controlar la intensidad total.

La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas, o por medio de un *variac*, el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente, es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

II.-Otras fuentes de corrientes:

Es posible que habiendo decidido utilizar el sistema de corriente impresa, no se disponga en la zona de líneas de distribución de corriente eléctrica, por lo que sería conveniente analizar la posibilidad de hacer uso de otras fuentes como:

- Dinamo con motor térmico: permite la protección catódica en donde no existe posibilidad de suministrar energía eléctrica, como en el caso de los desiertos o zonas selváticas. El motor térmico puede estar alimentado, ya sea directamente a partir de la conducción que se desea proteger, ya sea por un depósito que se llena periódicamente.
- Otros generadores termoeléctricos.
- Motores generadores.
- Baterías, de limitada aplicación por su bajo drenaje de corriente y vida limitada.

3.1.5 Corriente requerida para la protección.

Depende de varios factores:

- Área a proteger y condiciones del revestimiento.
- Resistividad eléctrica del suelo.
- Polarización de la estructura.
- Forma geométrica de la estructura³⁴.

Los factores antes mencionados suelen variar de manera que, en ocasiones, se pueden presentar todos o algunos de ellos, si se desea saber con precisión cual será la corriente de protección, es necesario hacer pruebas de requerimiento de corriente en el lugar. Si la tubería está en proyecto de construcción, y además se desea instalar en el lugar un sistema de protección catódica, el requerimiento de corriente se asume de acuerdo a la experiencia e información técnica disponible.

³⁴ Saavedra Cornejo, Walter Enrique. “*Optimización del Sistema de Protección Catódica en le Oleoducto Nor-Peruano*”. Tesis (Titulado en Ingeniería Industrial). Piura: Universidad de Piura, 1988. 32 pp.

3.2 Uso de recubrimientos protectores complementados con protección catódica. Sistemas duales.

3.2.1 Generalidades y consideraciones.

Las tuberías enterradas a diferencia de las que se localizan en la intemperie, se encuentran completamente sumergidas en un medio electrolítico. Como ya se comentó en el primer capítulo, cada suelo tiene características particulares de resistividad-conductividad y, a lo largo de la longitud de la línea, esta resistividad varía por efectos de cercanías a cuerpos de agua, instalaciones enterradas, bases de edificaciones, torres de alta tensión, otras tuberías, entre otras. La sola aplicación de un sistema de pinturas, no garantiza la protección contra la corrosión de las tuberías enterradas, para ello es necesario la aplicación de cierta clase de revestimientos, que aislen a la tubería del medio en que se encuentra, además de complementarla con un sistema de protección catódica, con lo cual la tubería tendrá una protección más eficaz. Estos revestimientos pueden ser:

- Polietileno o polipropileno,
- Resinas epóxicas de fusión,
- Brea epóxica,
- Imprimante y
- Cinta adhesiva de PVC (“tape”), etc.

El polietileno, polipropileno y resina epóxicas, son de aplicación industrial y las tuberías deben enviarse a plantas de revestimiento especializadas en aplicar este tipo de protección a los tubos. La brea epóxica y la combinación de imprimantes y cintas pueden aplicarse en sitio.

Ningún revestimiento garantiza una protección del 100%. Las impurezas que pueden encontrarse en la superficie del material, un mal o deficiente proceso de limpieza de la superficie metálica o, un mal o deficiente proceso de aplicación de la capa protectora, o ambos a la vez, o golpes y ralladuras al momento del transporte o instalación, pueden deteriorar el aislamiento. Es por esta razón que, para garantizar la prolongación de la vida útil de una tubería revestida, se debe acompañar, como mencionamos líneas arriba, de un sistema de protección catódica, es decir, que estaríamos hablando de un sistema dual.

Por lo tanto, la prevención de corrosión exterior en ductos enterrados y/o sumergidos, se llevará a cabo mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos, complementados con sistemas de protección catódica, salvo que se demuestre mediante un estudio técnico realizado por el área técnica responsable del control de la corrosión externa, que los materiales utilizados son resistentes al ataque corrosivo del medio ambiente en el cual son instalados. Se debe poner especial atención para atenuar los efectos de corrientes extrañas y parásitas, en caso de confirmar su existencia, esto suele ocurrir por ejemplo, si las tuberías se encuentran en instalaciones tales como: estaciones de compresión y bombeo, tanques, baterías de recolección, terminales de distribución, etc.

En las tuberías enterradas y/o sumergidas que serán protegidas catódicamente ya sea por medio de un sistema de ánodos galvánicos, o por un sistema de corriente impresa, como

complemento al recubrimiento anticorrosivo, se deberá verificar que el sistema de revestimiento escogido, sea el adecuado para proteger totalmente la instalación.

El sistema de protección catódica escogido, se debe instalar en forma simultánea a la construcción, y al concluirla se realizarán las pruebas, ajustes y refuerzos necesarios. De no ser así, se procederá a investigar las características esenciales, la resistencia al desprendimiento catódico del recubrimiento; las condiciones de operación, historia de la tubería, estadística de fugas del ducto; así como las condiciones del medio en donde se localiza la instalación, con el propósito de definir el sistema de protección catódica adecuado.

3.2.2 Factores a los cuales el recubrimiento debe mostrar resistencia

Se consideran importantes algunos factores que deben cumplir los recubrimientos, junto con el método de protección catódica aplicada:

- a)* Debe tener una alta resistencia eléctrica.
- b)* Impedir el paso de la humedad.
- c)* Su método de aplicación no debe afectar las propiedades de la tubería.
- d)* Una vez aplicado no debe manifestar defectos.
- e)* Ser resistente a microorganismos.
- f)* Resistente al manejo, almacenaje e instalación de la tubería.
- g)* Resistente al desprendimiento catódico.
- h)* Resistente al ataque químico.
- i)* Fácil de reparar.
- j)* Deberá de conservar sus propiedades físicas a través del tiempo.
- k)* No tóxico.
- l)* Resistente a efectos térmicos, al impacto y a la fricción.
- m)* Fácil aplicación.
- n)* Resistente a las acciones mecánicas del suelo.
- p)* Ductilidad.

3.2.3 Aislamiento e interferencias eléctricas que se dan en los sistemas duales de protección.

A una tubería de acero ya sea enterrada y/o sumergida a la que se desea proteger de la corrosión, se le debe otorgar un total aislamiento eléctrico respecto de cualquier otra estructura metálica o de concreto, que no esté considerada o no sea parte de la implementación del sistema de protección catódica.

La corriente eléctrica busca siempre recorridos de menor resistencia, y por esta razón, sigue con facilidad las canalizaciones metálicas enterradas, en particular las redes de puesta a tierra, las cañerías enterradas, entre unos ejemplo. Estas son las más expuestas al ataque corrosivo, sin embargo, existen otros tipos de instalaciones no-eléctricas asociadas, como los sistemas contra incendio, los distintos tipos de tanques, las cañerías de combustible, los sistemas de agua de enfriamiento, las bombas sumergidas, soportes de tubería, estructuras de puentes, túneles, pilotes, camisas de acero protectoras, recubrimientos de lastre, etc.

Todo esto se torna especialmente crítico, por ejemplo, en las centrales generadoras de energía eléctrica donde se emplean una gran variedad de metales, utilizando diversos métodos constructivos, con materiales operando en ambientes heterogéneos, agresivos, con altas temperaturas, diferencias de aireación, suelos heterogéneos, vibraciones e interconexiones entre metales diferentes.

Una manera de contribuir al aislamiento de la tubería, es colocando una junta de aislamiento, que es un accesorio constituido de un material aislante que se intercala en el sistema de tubería para separar eléctricamente a la tubería a proteger.

Estas juntas aislantes deben pasar por un proceso de selección, en donde se deben tener en consideración algunos factores primordiales para que su funcionamiento sea óptimo, como; su resistencia dieléctrica y mecánica, así como las condiciones de operación de la tubería. Se debe tener en cuenta además, que al momento de realizar cualquier instalación de junta aislante, se compruebe previamente la ausencia de atmósfera combustible.

Las juntas aislantes se deben instalar en los siguientes lugares:

- a) En cabezales de pozos.
- b) En el origen de ramales.
- c) En la entrada y salida de la tubería en estaciones de medición y/o regulación de presión, de compresión y/o bombeo.
- d) En las uniones de metales diferentes para protección contra la corrosión galvánica;
- e) En el origen y final del sistema de tuberías que se deseen proteger, para prevenir la continuidad eléctrica con otro sistema metálico.
- f) Por último, en la unión de una tubería recubierta con otra tubería descubierta.

3.3 Generación de gas por electrólisis.

3.3.1 Fundamentos y aspectos generales de la electrólisis.

Para hablar de éste fenómeno, podemos empezar mencionando el efecto de la galvanización, nombre recibido en honor del científico italiano *Luigi Galvani*, que define a la electricidad desarrollada por contacto de dos metales diferentes, generalmente el cobre y el zinc, sumergidos en medios acuosos. A la descomposición química producida por esta corriente se la denomina electrólisis³⁵. Entonces la electrólisis o electrolisis es un método de separación de los elementos que forman un compuesto aplicando electricidad, se produce en primer lugar la descomposición en iones, seguido de diversos efectos o reacciones secundarias según los casos concretos. También se dice que la electrólisis es un proceso inverso al que ocurre en una pila eléctrica.

Al cuerpo capaz de descomponerse por la acción de la electrólisis se le llama electrolito, y a los conductores que sirven para la entrada y salida de corriente se les denomina electrodos.

³⁵ Cueto; Lopes, S. L. “La corrosión galvánica en la náutica. Ánodos de sacrificio”. Miembros de la Asociación Profesional de Peritos y Comisarios de Averías APCAS. 30 de Abril del 2005. <en línea> <http://www.cueto-lopez.com/pagina.php?n=8>

La palabra electrólisis se puede descomponer en dos partes radicales, *electro* que hace referencia a electricidad y, *lisis* que quiere decir rotura.

La electrólisis es un proceso donde la energía eléctrica cambiará a energía química. El proceso sucede en un electrolito, una solución acuosa o sales disueltas que den la posibilidad a los iones de ser transferidos entre dos electrodos. El electrolito es la conexión entre los dos electrodos, que también están conectados con una corriente directa. Esta unidad se llama célula de electrolisis³⁶.

El proceso electrolítico consiste en lo siguiente, se disuelve una sustancia en un determinado disolvente, con el fin de que los iones que constituyen dicha sustancia estén presentes en la disolución. Posteriormente, se aplica una corriente eléctrica a un par de electrodos conductores colocados en la disolución. El electrodo cargado negativamente se conoce como cátodo y, el cargado positivamente como ánodo. Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. Así, los iones positivos o cationes, son atraídos al cátodo, mientras que los iones negativos o aniones, se desplazan hacia el ánodo. La energía necesaria para separar a los iones e incrementar su concentración en los electrodos, proviene de una fuente eléctrica de poder que mantiene la diferencia de potencial en los electrodos.

La conducción electrolítica, en la cual la carga es transportada por los iones, no ocurrirá a menos que los iones del electrolito puedan moverse libremente. La conducción electrolítica es exhibida principalmente por sales fundidas y por soluciones acuosas de electrolitos. Por consiguiente, una corriente que pase a través de un conductor electrolítico, requiere que el cambio químico acompañe el movimiento de los iones.

La electrólisis no depende de la transferencia de calor, aunque éste puede ser producido en un proceso electrolítico, por tanto, la presencia de calor es un indicador que se está iniciando un proceso de electrolisis, lo que nos debería hacer tomar las precauciones del caso.

Esto es importante, pues cuando se protege catódicamente una estructura enterrada y/o sumergida, se puede dar indirectamente el fenómeno de la electrolisis. Por último, añadimos que los procesos de electrolisis son difíciles de controlar.

3.3.2 Generación y desprendimiento de gas.

La acción de una corriente sobre un electrolito, generará un determinado gas dependiendo de la composición del electrolito, esto puede entenderse con un ejemplo sencillo. Si el sulfato de cobre se disuelve en agua, se disocia en iones cobre positivo e iones sulfato negativo. Al aplicar una diferencia de potencial a los electrodos, los iones cobre se mueven hacia el electrodo negativo, se descargan, y se depositan en el electrodo como elemento cobre. Los iones sulfato, al descargarse en el electrodo positivo, son inestables y se combinan con el agua de la disolución formando ácido sulfúrico y oxígeno. Otro ejemplo sencillo es el de la electrólisis del agua, en la que el paso de corriente descompone este líquido en sus elementos constituyentes: hidrógeno y oxígeno. Esto último se presenta en el caso de tuberías enterradas y/o sumergidas

³⁶ Lenntech “*Water Purification and Air Treatment*” <en línea>
<http://www.lenntech.com/espanol/formulario-de-consulta.htm>

protegidas catódicamente, pues el medio electrolítico donde se encuentran estas instalaciones suelen ser medios acuosos.

El desprendimiento de hidrógeno y oxígeno tiene lugar en la reacción de electrolisis del agua, durante la fase final de carga y especialmente si ocurre sobrecarga (es decir, cuando se suministra corriente en exceso a la estructura a proteger, ya sea por algún error humano o de cálculo)³⁷. Se debe verificar la carga y de ser necesaria, regular la intensidad que suministra la fuente de corriente. El hidrógeno es un gas extremadamente inflamable y, si este se encuentra en las concentraciones del rango de inflamabilidad o explosividad en un recinto cerrado, existe el riesgo de explosión ante la presencia de cualquier foco de ignición. Se debe evitar una concentración que alcance el límite inferior de explosividad del hidrógeno, que se encuentra en un 4% con respecto al volumen total del aire³⁸.

3.3.3 Desprendimiento catódico en tuberías enterradas y/o sumergidas.

Microscópicamente existen orificios en la superficie del recubrimiento o pintura que cubre la superficie metálica de la tubería, sin embargo, son demasiado pequeños como para que el hidrógeno gaseoso (H_2 (gaseoso)), que se forma debido a la electrólisis del agua, salga a través de ellos. Es así que, se van formando pequeñas burbujas o ampollas de gas entre la superficie de la tubería y la película de pintura. Este hidrógeno con el tiempo, va ejerciendo una presión contra la capa de pintura; la capa resistirá hasta que llegue un momento en que se rompa y exponga una fracción de la superficie de la tubería, permitiendo la entrada de la humedad a través de ella dando paso a la oxidación del metal. A esto se le conoce como desprendimiento catódico (*cathodic disbonding*), en base a que la pintura se deteriora por la formación de ampollas, siendo este un lugar propicio para la corrosión. El tiempo para que las ampollas formadas se rompan, depende de la fragilidad de la pintura. El diámetro de las ampollas puede variar, dependiendo del tamaño de la superficie metálica. Otro punto a considerar es la preparación superficial, ya que mientras esta se realice de la mejor manera, mayor resistencia al desprendimiento catódico habrá en la tubería.

Como ya se dijo anteriormente, para evitar de alguna manera la corrosión de las estructuras metálicas, se usan sistemas duales de protección. Estos sistemas tienen como inconveniente, que a potenciales muy negativos, (es decir menores a -1500 mV, valor que depende de la resistencia que tenga el recubrimiento al desprendimiento catódico), se corre el riesgo de sobreprotección debido al exceso de electricidad. Por tanto, afecta de manera muy considerable al recubrimiento de la pintura, debido a que ocurre una reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso en la superficie (formación y desprendimiento de H_2), que se manifiesta con un ampollamiento en la pintura.

3.3.4 Control y medidas de seguridad.

Entre los focos o fuentes de ignición de posible presencia a evitar en trabajos donde exista riesgo de desprendimiento de gas hidrógeno, se citan:

³⁷ Turmo Sierra, Emilio. “NTP 617: Locales de carga de baterías de acumuladores eléctricos de plomo-ácido sulfúrico”. Instituto de Seguridad e Higiene en el Trabajo. <en línea> http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_617.htm

³⁸ *Ibidem*.

- Cerillas o encendedores utilizados para observar alguna circunstancia que esté ocurriendo en el sistema. Se debería recurrir a linternas eléctricas o a pilas.
- Llamas de sopletes para soldadura o corte. Estas operaciones se deben hacer en lugares apartados (de ser necesario retirar la estructura en la cual se desea realizar la operación), que no se encuentre cerca de las instalaciones, y establecer permisos de trabajos especiales.
- Chispas por cortocircuitos con herramientas u objetos metálicos.
- Chispas originadas al instalar o desmontar algún instrumento eléctrico, como una batería u otro aparato, mientras la corriente circula por las estructuras de la instalación.
- Fumar cigarrillos. Debe estar totalmente prohibido.
- Chispas en la conexión o desconexión de la fuente de energía. Se debe realizar la operación, desconectando previamente el interruptor de la fuente. En todo caso, la fuente de energía se debe mantener alejada de la instalación.

Capítulo IV

Parte Experimental.

4.1 Preparación del espécimen de prueba.

Las probetas en evaluación serán 21 planchas de 40x10cm y 0.312” (0.79248cm = 0.8cm) aproximadamente 1cm de espesor y 3 trozos de tubería de 41cm de longitud y 6.2cm de diámetro¹. Se trabajará con una cantidad de 24 probetas, cada una está dividida en ocho grupos con tres probetas cada uno. A su vez, cada grupo corresponde a un proveedor de pintura diferente, es decir, hay ocho sistemas de recubrimientos de diferentes proveedores en evaluación. A continuación se muestran las fotos de las probetas ya preparadas para el ensayo.

¹ Cfr. Anexo B1

Probetas:



Figura 4.1a) Probeta G8-04e, parte frontal.



Figura 4.1b) Probeta G8-04e, parte posterior.



Figura 4.2a) Probeta G8-05e, parte frontal.



Figura 4.2b) Probeta G8-05e, parte posterior.



Figura 4.3a) Probeta G8-06e, parte frontal.



Figura 4.3b) Probeta G8-06e, parte posterior.



Figura 4.4a) Probeta G8-10e, parte frontal.



Figura 4.4b) Probeta G8-10e, parte posterior.



Figura 4.5a) Probeta G8-11e, parte frontal.



Figura 4.5b) Probeta G8-11e, parte posterior.



Figura 4.6a) Probeta G8-12e, parte frontal.



Figura 4.6b) Probeta G8-12e, parte posterior.



Figura 4.7a) Probeta G8-16e, parte frontal.



Figura 4.7b) Probeta G8-16e, parte posterior.



Figura 4.8a) Probeta G8-17e, parte frontal.



Figura 4.8b) Probeta G8-17e, parte posterior.



Figura 4.9a) Probeta G8-18e, parte frontal.



Figura 4.9b) Probeta G8-18e, parte posterior.



Figura 4.10a) Probeta G8-40e, parte frontal.



Figura 4.10b) Probeta G8-40e, parte posterior.



Figura 4.11a) Probeta G8-41e, parte frontal.



Figura 4.11b) Probeta G8-41e, parte posterior.



Figura 4.12a) Probeta G8-42e, parte frontal.



Figura 4.12b) Probeta G8-42e, parte posterior.



Figura 4.13a) Probeta G8-46e, parte frontal.



Figura 4.13b) Probeta G8-46e, parte posterior.



Figura 4.14a) Probeta G8-47e, parte frontal.



Figura 4.14b) Probeta G8-47e, parte posterior.



Figura 4.15a) Probeta G8-48e, parte frontal.



Figura 4.15b) Probeta G8-48e, parte posterior.

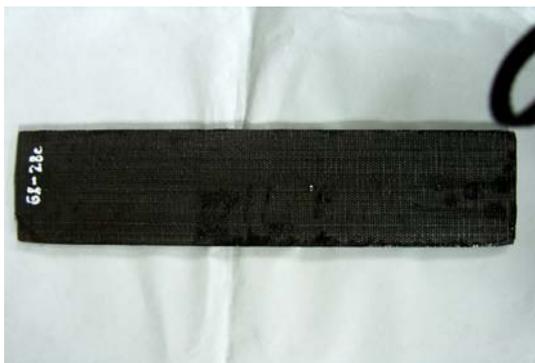


Figura 4.16a) Probeta G8-28e, parte frontal.



Figura 4.16b) Probeta G8-28e, parte posterior.



Figura 4.17a) Probeta G8-29e, parte frontal.



Figura 4.17b) Probeta G8-29e, parte posterior.



Figura 4.18a) Probeta G8-30e, parte frontal.



Figura 4.18b) Probeta G8-30e, parte posterior.



Figura 4.19a) Probeta G8-34e, parte frontal.



Figura 4.19b) Probeta G8-34e, parte posterior.



Figura 4.20a) Probeta G8-35e, parte frontal.



Figura 4.20b) Probeta G8-35e, parte posterior.



Figura 4.21a) Probeta G8-36e, parte frontal.



Figura 4.21b) Probeta G8-36e, parte posterior.

Tuberías:**Figura 4.22a) Probeta G8-C1e, vista 1.****Figura 4.22b) Probeta G8-C1e, vista 2.****Figura 4.23a) Probeta G8-C2e, vista 1.****Figura 4.23b) Probeta G8-C2e, vista 2.****Figura 4.24a) Probeta G8-C3e, vista 1.****Figura 4.24b) Probeta G8-C3e, vista 2.**

4.1.1 Preparación de la superficie de las probetas.

Este apartado muestra una tabla en la que se especifica el código y el nombre del proveedor de pintura, la codificación de las probetas que pertenecen a cada proveedor, el método empleado por cada proveedor para la preparación de la superficie metálica antes de la aplicación del recubrimiento y la norma utilizada para el mismo.

La preparación de las superficies antes del pintado, fue realizada por los mismos proveedores de las probetas.

Tabla 4.1. Preparación de superficies.

PREPARACION DE SUPERFICIES				
Proveedor		Probeta	Método	Norma
Código	Nombre			
1	CHEMIFABRIK PERÚ	04e, 05e, 06e	Mecánica con perfil de anclaje.	SSPC-SP3/SP11
2	COATING S.R.L.	10e, 11e, 12e	Química, manual y mecánica.	SSPC-SP1/SP2/SP3
3	CPPQ	16e, 17e, 18e	Química, manual y mecánica.	SSPC-SP1/SP2/SP3
4	CINTA BLANCA	C1e, C2e, C3e	Mecánica con perfil de anclaje.	SSPC-SP3/SP11
5	POLYGUARD PRODUCTS	28e, 29e, 30e	Manual y mecánica.	SSPC-SP2/SP3
6	TRENTON	34e, 35e, 36e	Química, manual y mecánica.	SSPC-SP1/SP2/SP3
7	VENCEDOR	40e, 41e, 42e	Manual y mecánica.	SSPC-SP2/SP3
8	Corporación Mara	46e, 47e, 48e	Mecánica con perfil de anclaje.	SSPC-SP3/SP11

4.1.2 Recubrimientos aplicados.

La tabla que sigue muestra los revestimientos empleados por cada proveedor de pintura. En cada uno se especifica el sistema que se utilizó para el pintado de las superficies metálicas.

Proveedor		T°C				Sistema de		
Código	Nombre	Max	Min	ROS	HR %	Base	Color 1	Enlace
1	CHEMIFABRIK PERÚ	30	40	20	55	Epóxico poliamida	Verde	Epóxico coaltar poliamida
2	COATING S.R.L.	40	40	20	60	Epóxico	Amarillo	Epóxico
3	CPPQ	27.5	35	20	55	Epóxico	Blanco	Epóxica coaltar
4	CINTA BLANCA	30	40	20	60	Adhesivo	Negro	Alquitrán / caucho
5	POLYGUARD PRODUCTS	30	40	20	60	Hydrocar- bón mixture	Negro	Alquitrán / caucho
6	TRENTON	30	30	20	60	Temcoat	Negro	Cera microcris- talina #1
7	VENCEDOR	26	31	18	44	Epóxico	Rojo	Epóxica
8	Corporación Mara	25.5	40	20	55	Epóxico	Amarillo	Epóxica

Tabla 4.2. Sistema de revestimiento de superficies.

4.1.3 Sistema de aplicación de los recubrimientos.

En la tabla que sigue, se presenta el sistema o la herramienta que utilizó cada proveedor para la aplicación de los recubrimientos, en las probetas metálicas suministradas.

Tabla 4.3. Sistema de aplicación de los recubrimientos.

Código	Proveedor	Probeta	Equipo de aplicación
	Nombre		
1	CHEMIFABRIK PERÚ	04e, 05e, 06e	Airless
2	COATING S.R.L.	10e, 11e, 12e	Airless
3	CPPQ	16e, 17e, 18e	Airless
4	CINTA BLANCA	C1e, C2e, C3e	Mecánica
5	POLYGUARD PRODUCTS	28e, 29e, 30e	Mecánica
6	TRENTON	34e, 35e, 36e	Manual
7	VENCEDOR	40e, 41e, 42e	Brocha
8	CORPORACION MARA	46e, 47e, 48e	Brocha

4.2 Equipos utilizados.

A continuación mencionaremos los equipos utilizados específicamente en la prueba de desprendimiento catódico. Se debe emplear equipos que al menos cuenten con las características impuestas por la norma ASTM G8.

a) Recipiente de prueba: un material no conductor, como el plástico, será utilizado para construir un recipiente².

b) Conectores: el cableado del ánodo para la probeta será cobre aislado 4107-cmil (calibre 14 AWG) mínimo.

c) *Holiday detector*: para hacer la prueba de detección de defectos según la norma ASTM G62, se utiliza un dispositivo eléctrico sumamente sensible diseñado para localizar defectos como agujeros, vacíos, y puntos delgados del revestimiento que no son observados fácilmente. Este dispositivo tiene las siguientes características: una fuente de energía eléctrica entre 900 y 20000 V d.c, un electrodo de exploración consistente de una escobilla de alambre, un resorte en espiral, o, en todo caso un electrodo conductor de silicio capaz de moverse a lo largo del revestimiento de la tubería; y un indicador de audio que permitirá señalar la existencia de defectos en el revestimiento de alta resistencia eléctrica sobre un sustrato metálico. Un cable a tierra, conecta el detector con la superficie del metal de resistencia baja³.

² Las dimensiones del mismo se calcularán en el apartado 4.4.1.1 del mismo capítulo.

³ Norma ASTM G62.



Figura 4.25a) Holiday detector, vista 1.

Figura 4.25a) Holiday detector, vista 2.

d) Voltímetro de alta resistencia: para medición en corriente directa, con una resistencia interna no menor a $10\text{M}\Omega$ y teniendo un rango entre 0,01 a 5 V para la medida del potencial respecto al electrodo de referencia.



Figura 4.26 En el extremo izquierdo podemos apreciar el voltímetro de alta resistencia.

e) Electrodo de referencia Cu/CuSO_4 saturado: convencional de vidrio o tubo de plástico, con la construcción de un tabique poroso, preferiblemente de no más de 20 mm de diámetro.

f) Medidor de espesores: para medir el espesor del revestimiento de acuerdo con el método de la Norma *ASTM G12*. Ver figura 4.28.



Figura 4.28. Medidor de espesores.

g) Multímetro Philips PM 2521: para medir la corriente total del sistema, capaz de medirla de $10\mu\text{V}$ a 200mV , con una precisión de $\pm 0,03\%$ de lectura + $0,01\%$ de rango de medida.



Figura 4.27. Multímetro philips.

h) Pernos de acero galvanizado: usados para la conexión de las probetas por medio de los cables. También se requiere pinzas cocodrilo o interruptores del cuchillo, para abrir los circuitos. Las pinzas cocodrilo serán utilizadas para conectar los electrodos o las probetas en la parte superior de las celdas de prueba.

i) Multímetro digital data logger PAN 9121: utilizado para medir el potencial total del sistema, con una resistencia interna no menor de $100\text{M}\Omega$ (200mV). Tiene una tensión a circuito abierto de $1,5 \pm 0,2 \text{ V}$ (200). Cuenta con un canal A y un canal B, de los cuales sólo se utilizó el canal A.



Figura 4.29. Multímetro digital data logger.

j) Rectificador de corriente directa: capaz de proveer un voltaje máximo de 12 V y una intensidad máxima de 10A.



Figura 4.30. Rectificador de corriente.

k) Ánodo de corriente impresa: se utilizarán placas de acero inoxidable como dispersores.

4.3 Materiales y reactivos.

A continuación se describen los materiales y reactivos utilizados en la prueba de desprendimiento catódico. Solo el punto a) se debe considerar de forma obligatoria, pues así lo menciona la norma ASTM G8. Los demás puntos se pueden tener en cuenta, o de lo contrario usar materiales con características similares.

a) Según la norma ASTM G8, el electrolito deberá contener agua potable con la adición de 1 % en masa total de cada una de las siguientes sales de grado técnico; calculado sobre una base anhidra compuesta por cloruro de sodio, sulfato de sodio, y carbonato de sodio. Esta solución se debe utilizar recientemente preparada para la prueba⁴.

b) El material para sellar los extremos de las probetas revestidas consistirá en una cinta aislante vinílica de tipo 3M Templex, cuyas medidas son 19mm x 20m x 0.177mm.

c) Para aislar a la parte posterior de las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e de la corrosión, se usará el material compuesto por una mezcla consistente de resina (bisphenol A y epiclorohídrin) y endurecedor (monophenol y polyoxypropylenediamine).

d) Canaletas plásticas, para armar la estructura del sistema del ensayo.

e) Silicona común, utilizada para pegar las diferentes secciones de la estructura del sistema del ensayo.

4.4 Procedimiento de ensayo.

4.4.1 Descripción del procedimiento.

Este apartado comprende cuatro partes. Las dos primeras partes, consisten en la descripción detallada y minuciosa de los cálculos, tanto de las medidas del recipiente como también de los reactivos usados en el electrolito. La tercera fue la preparación previa de las probetas siguiendo los parámetros que indica la norma ASTM G8, antes de ser colocadas en los recipientes de prueba. La cuarta y última parte, comprende la construcción de una estructura sólida donde puedan colocarse las probetas, para que posteriormente se de el ensamblaje de éstas en la estructura, culminando así con la construcción final del sistema. Inmediatamente después se iniciaron las pruebas de desprendimiento catódico, que es el objetivo de este trabajo.

A continuación en la figura 4.31, se muestra el esquema eléctrico básico, del sistema utilizado en este ensayo, adaptado del sistema sugerido por la norma ASTM G8, para crear las condiciones catódicas de las probetas. En el esquema, se observa como van conectados los equipos, considerando algunas limitaciones como fueron, la falta de un reóstato, para regular el potencial de cada grupo independiente de especímenes, y

⁴ El cálculo exacto de los reactivos se hará en el apartado 4.4.1.2 del mismo capítulo.

también la falta de resistores “shunt” no instalados, que se utilizan para medir la corriente que fluye hacia cada probeta.

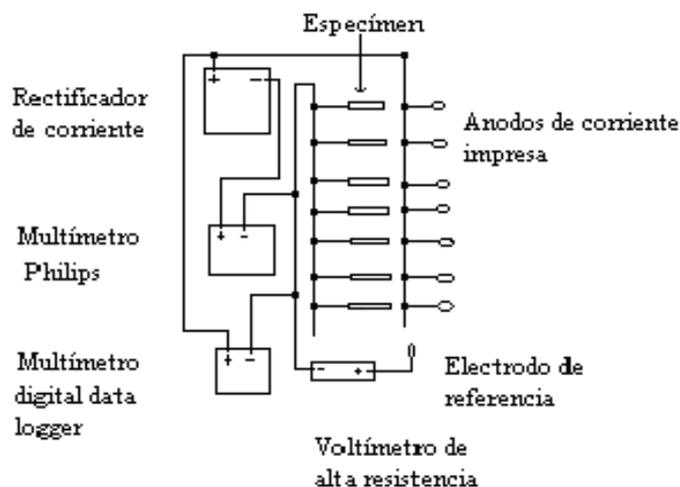


Figura 4.31. Esquema utilizado en el ensayo.

4.4.1.1 Selección del recipiente de prueba.

A continuación mencionaremos cinco puntos que condicionan las medidas específicas del recipiente de prueba:

- Las probetas serán suspendidas verticalmente en el recipiente con una separación del fondo de por lo menos 25mm (2.5cm).
- Cada probeta será separada de las otras probetas, de los ánodos y de las paredes del recipiente de prueba a una distancia de por lo menos 40mm (4cm).
- La profundidad del electrolito permitirá que la longitud de la probeta sea sumergida como se requiere en esta prueba.
- Se debe tener en cuenta que el área sumergida de la probeta en el electrolito será no menor a 23 000mm².
- El electrodo de referencia se puede colocar en cualquier parte del recipiente, tal que pueda ser separado de la probeta y del ánodo a una distancia no menor a 40mm (4cm)⁵.

Teniendo en cuenta los puntos mencionados anteriormente procederemos a calcular las medidas del recipiente.

En este caso sumergiremos a algunas de las probetas a una altura de 20cm, medida que se tomará desde el borde inferior. Esto quiere decir, que son 20000mm² = 20cm x 10cm por cara, por tanto, se sumergirá 40000mm² en total, a excepción de las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e, en las cuales solo se evaluará la parte frontal. Estas últimas se han sumergido a una altura de 23cm, lo que equivale decir que se tendrá un área sumergida de 46000mm² de la cual solo se evaluará un área de 23000mm² (23cm x

⁵ Cfr. Norma ASTM G8.

10cm), es decir una cara, pues solo ésta ha sido recubierta por el proveedor. Por último en las tuberías G8-C1e, G8-C2e, G8-C3e se estará evaluando un área de 38955.84mm^2 ($2\pi rh^2 = 2\pi * 3.1 * 20$).

A continuación haremos un cálculo de la altura. Consideraremos dos medidas, la primera será la altura (h), que será la altura mínima del recipiente. La segunda será la altura (h¹), que será la altura que ocupará el electrolito dentro de las bandejas A y C. Entonces decimos:

$$h = 2.5\text{cm} + 20\text{cm} + 3\text{cm} = 25.5\text{cm}.$$

$$h^1 = 2.5\text{cm} + 20\text{cm} = 22.5\text{cm}$$

Debido a que las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e se encuentran en el segundo recipiente (bandeja B) se considerará una altura del electrolito de 23cm. Las probetas del proveedor con código 7 y 8, simplemente se les suspenderá verticalmente $2.5\text{cm} + 3\text{cm} = 5.5\text{cm}$, con lo cual seguirán estando sumergidas 20000mm^2 . Los últimos 3cm son un espacio extra que se deja para mayor comodidad al momento de la instalación de los objetos dentro del recipiente.

Para un mejor aprovechamiento del espacio y para mayor comodidad en el desarrollo de las pruebas, se vio necesario tener tres recipientes. En el primer y segundo recipiente se colocaron nueve probetas, tres columnas con tres probetas cada una, una al costado de la otra, es decir, se colocaron tres grupos de proveedores de pintura en los dos primeros recipientes. En el tercer recipiente, se colocaron las tres probetas restantes y las tres tuberías en dos columnas, es decir los dos últimos grupos de proveedores⁶. En el primer recipiente (bandeja A) se colocaron las siguientes probetas: G8-04e, G8-05e, G8-06e, G8-10e, G8-11e, G8-12e, G8-16e, G8-17e, G8-18, como se muestra en la figura 4.31. En el segundo recipiente (bandeja B) se colocaron las siguientes probetas: G8-40e, G8-41e, G8-42e, G8-46e, G8-47e, G8-48e, G8-28e, G8-29e, G8-30e, como se muestra en la figura 4.32. En el tercer recipiente (bandeja C) se colocaron las siguientes probetas: G8-34e, G8-35e, G8-36e, G8-C1e, G8-C2e, G8-C3e, como se muestra en la figura 4.33.



Figura 4.32. Bandeja A, primer grupo.



Figura 4.33. Bandeja B, segundo grupo.

⁶ Cfr. figura 4.34.

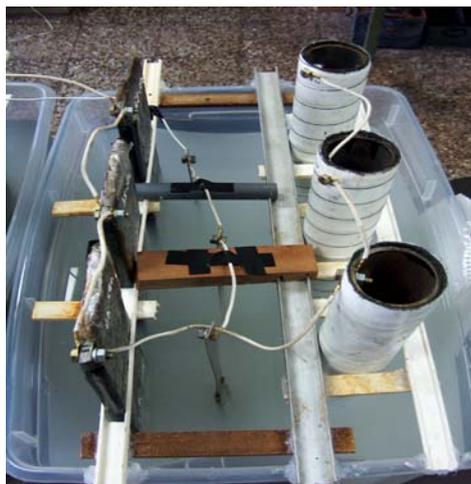


Figura 4.34. Bandeja C, tercer grupo.

Con todo lo antes mencionado, se calcula que el largo (L) del recipiente sería de 46cm y el ancho (a) sería 29cm. Sin embargo, hay que aclarar que debido a que en el mercado local no se encuentran recipientes que cuenten a la vez con todas las dimensiones expuestas para esta prueba, sirven como base de referencia para conseguir el recipiente que más se ajuste a las dimensiones obtenidas.

Finalmente, las dimensiones del recipiente que se usaron en la prueba, son las siguientes:

- Largo (L): 54cm.
- Ancho (a): 37.5cm.
- Altura (h): 28.5cm.
- Altura (h¹): 22.5cm.

4.4.1.2 Cálculo de los reactivos utilizados.

Sabiendo que las dimensiones del recipiente son largo (L) 54cm, ancho (a) 37.5cm, altura (h) 28.5cm y considerando que la altura sumergida del espécimen de prueba es de 20cm y 23cm para las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e, calculamos el volumen de la solución y la cantidad exacta de cada una de las sales que se necesitarán en la prueba:

Primero tenemos que calcular el volumen del electrolito:

$$L \cdot a \cdot h^1 = (54) (37.5) (22.5) = 45562.5\text{cm}^3 = 0.0455625\text{m}^3. \text{ (Bandeja A y C).}$$

$$L \cdot a \cdot h^1 = (54) (37.5) (25.5) = 51637.5\text{cm}^3 = 0.0516375\text{m}^3. \text{ (Bandeja B).}$$

Luego, tomamos la densidad del agua que es 998.2 Kg/m³ a 20°C y 995.6 Kg/m³ a 30°C; como las pruebas se harán entre los 20°C y 30°C, sacamos un promedio de la densidad del agua correspondiente a 996.9Kg/m³. Con ese dato decimos:

$$(0.0455625\text{m}^3) \times (996.9\text{Kg/m}^3) = 45.421256\text{Kg} = 45421.2562\text{gr.}$$

$$(0.0516375\text{m}^3) \times (996.9\text{Kg/m}^3) = 51.477423\text{Kg} = 51477.4237\text{gr.}$$

Las cantidades de 45421.2562gr y 51477.4237gr son la masa total aproximada de electrolito que habrá en las bandejas A y C, y en la bandeja B respectivamente.

Entonces sacamos el 1% de la masa total de cada bandeja que vendría a ser 454.21gr para la bandeja A y C y 514.77gr para la bandeja B. Como se sabe que son tres los componentes que conforman la solución, tendríamos de cada uno 151.404gr y 171.59gr, que es igual aun aproximado de 152gr y 172gr de cloruro de sodio, 152gr y 172gr de sulfato de sodio y 152gr y 172gr de carbonato de sodio. Como se van a utilizar tres recipientes de prueba, necesitaríamos aproximadamente 3 x 152gr que equivalen a un total de 456gr de solución para la bandeja A y C, y 3 x 172gr equivalente a 516gr de solución para la bandeja B. Sumando las tres bandejas, se hizo uso total de $(456\text{gr} \times 2) + 516\text{gr} = 1428\text{gr}$ de sales para el ensayo.

4.4.1.3 Preparación previa de las probetas.

La primera prueba que se hizo con las probetas fue la de medición de espesores como lo establece la norma ASTM G12. Se tomaron doce medidas aleatorias en la superficie frontal y doce medidas aleatorias en la parte posterior⁷. Se trató de que las medidas tomadas abarquen toda la superficie de la probeta.

También se hizo una evaluación visual en ambas caras de la probeta para determinar principalmente los defectos que dejó el instrumento que se utilizó para aplicar el recubrimiento, además de otros defectos o fallas. Luego se realizaron las pruebas de detección de defectos con el *holiday detector*, como lo indica la norma ASTM G62⁸.

Posteriormente se procedió a hacer los *holidays*, de acuerdo a las indicaciones de la norma ASTM G8. Estos *holidays* son pequeñas fallas o agujeros que permiten el drenaje de la corriente a través de los revestimientos protectores. Se hicieron en total 3 *holidays*, dos en la parte frontal y una en la parte posterior, para lo cual se utilizó un taladro con diámetro de 6mm. Las fallas de la parte frontal fueron hechas, la primera (inferior) a una distancia de 6cm y la segunda (superior), a una distancia de 16cm con respecto al borde inferior. En cuanto a la falla en la parte posterior, se hizo a una distancia de 10cm también con respecto al borde inferior. Debido a que la parte frontal de la probeta está mejor preparada que la posterior, se convino realizar en ella dos de las tres fallas que indica la norma ASTM G8. Para el caso específico de las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e (tuberías recubiertas con cintas), sólo se les realizaron dos *holidays* en la parte frontal debido a que, a diferencia de las otras probetas, la parte posterior no estaba recubierta; por lo que únicamente la cara frontal es objeto de evaluación. En el caso de las tuberías, se les hizo las tres fallas a una distancia de 120° una con respecto a la otra, y a una distancia de 12cm con respecto al borde inferior. Luego con el mismo taladro se procedió a perforar la esquina superior izquierda de la probeta, para posteriormente colocar un perno de acero galvanizado que ajustará el cable de conexión del sistema.

Previamente a la colocación del perno, con un esmeril pequeño, se procedió a quitar la pintura de alrededor de uno sólo de los lados de la perforación para permitir la continuidad de la corriente al momento de colocar los conectores, unidos a los cables, y los pernos para armar el circuito. Una vez que se quitó la pintura con el esmeril, se hizo una comprobación mediante el voltímetro, en todas las probetas para determinar si el área que se había limado era suficiente como para permitir el paso de la corriente. A su vez, a las probetas G8-28e, G8-29e, G8-30e, G8-34e, G8-35e y G8-36e se les realizó

⁷ Cfr. anexo B1

⁸ Cfr. anexo B2

una pequeña incisión con una navaja en la misma esquina debido a que su recubrimiento era diferente al de las otras probetas⁹, incisión que no fue necesaria para en el caso de las tres primeras porque la parte posterior de estas probetas ya se encontraba descubierta. El objetivo de la incisión fue descubrir una pequeña área para que permitiera el paso de la corriente. Lo mismo sucedió con las tuberías G8-C1e, G8-C2e y G8-C3e, en las cuales tampoco hubo necesidad de hacerles incisión alguna, debido a que la parte interna estaba totalmente descubierta y se comprobó que había paso de corriente.

El paso siguiente consistió en colocar cinta aislante en todo el borde de la probeta, como indica la norma ASTM G8, menos a las tuberías a las cuales se les puso una tapa de plástico en la parte inferior la cual evitaría que al introducir la tubería al agua, ésta ingresase produciendo corrosión interna, la cual no es evaluada en este trabajo. Primero se aplicó una mezcla de resina y endurecedor en el borde de la tubería del extremo inferior y luego con silicona se pegó y ajustó una tapa de plástico, que debió ensamblar de forma precisa. En el caso de las probetas G8-34e, G8-35e y G8-36e, antes de colocarles las cintas en los bordes, se les aplicó la última capa de *poly film* en toda la superficie frontal y posterior. A las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e, también se les aplicó una mezcla de resina y endurecedor en la parte posterior (descubierta), hasta una distancia de 25cm con respecto al borde inferior. Esto se hizo para evitar la corrosión de esa área de la probeta durante el ensayo, la cual no estaba en evaluación.

Con esto se terminó la preparación de las probetas y quedaron listas para colocarlas en los recipientes de prueba.

4.4.1.4 Construcción del sistema final.

Las probetas se colocaron en los recipientes de la manera como se describió en el apartado 4.4.1.1 de este capítulo. Se utilizaron canaletas plásticas para construir una armadura que evitara el movimiento de las probetas, de tal manera que queden sujetas al recipiente. Se pegaron las canaletas entre sí y estas al recipiente con silicona.

Para lograr la altura de 2.5cm en las bandejas A y C, y de 5.5cm en la bandeja B sobre el piso del recipiente como exige la norma, se colocaron trozos de una canaleta y de tuberías plásticas cortados anteriormente con una medida determinada. Estos pedazos se pegaron al fondo del recipiente con silicona, de tal manera que junto con la armadura antes diseñada, permitan que los especímenes no se muevan.

Se hicieron varias pruebas hasta que se logró la estabilidad de las probetas dentro del recipiente. Una vez colocados los especímenes, se prosiguió a la conexión en cadena de todos. Luego se colocaron los ánodos de acero inoxidable. Se pusieron seis ánodos en los dos primeros recipientes por entre las filas de las probetas y tres en el último recipiente por entre la fila de probetas y la fila de tuberías. Los ánodos también se conectaron en cadena. Estos a su vez, se sujetaron con cinta aislante por sobre la armadura construida con canaletas, de tal manera que mantengan la distancia con respecto a las probetas establecida por la norma ASTM G8, y eviten el choque de éstas durante el ensayo. Luego se verificó el paso de corriente (continuidad), en toda la cadena de conexión hecha, tanto en las probetas como en los ánodos.

⁹ Cfr. figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, y tabla 4.2.

Luego se hizo la conexión con el rectificador, el polo positivo del mismo se conectó a los ánodos de acero inoxidable y el polo negativo a las probetas. El paso siguiente fue instalar el multímetro, utilizado para medir la corriente total del sistema I1 y el multímetro digital (*data logger*), usado para medir el potencial total del sistema Et. Ningún instrumento se encendió hasta el momento de dar inicio al ensayo.

Finalmente, se vertió cuidadosamente en los recipientes la solución salina preparada con el agua potable previamente mezclada con los reactivos que exige la norma ASTM G8. El sistema quedó así listo para comenzar las pruebas.

El sistema terminado se puede apreciar en la figura 4.34.

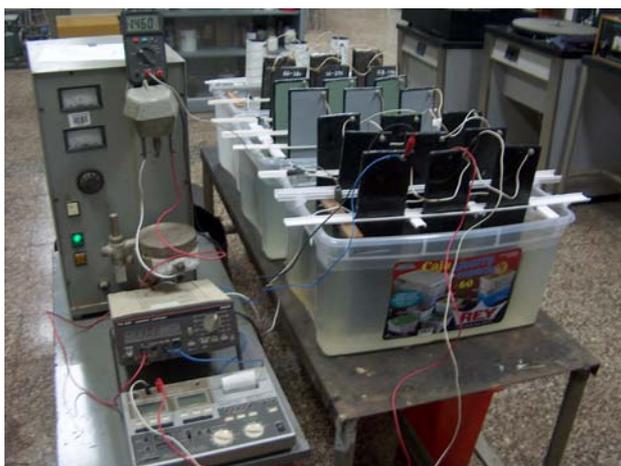


Figura 4.35. Sistema de ensayo según norma ASTM G8.

4.4.2 Ensayos realizados.

La norma ASTM G8 indica realizar un ensayo de 720 horas (30 días) como mínimo, pero el ensayo que se realizó en el laboratorio de metalotecnia y corrosión de la UDEP se hizo en 743 horas. Esto debido a las fechas y horas de inicio del ensayo, comenzó un viernes a las 12:00 p.m y debía terminar un día domingo a las 12 p.m. (720 horas), el cual por ser día no laborable, se tuvo que esperar hasta el día lunes 13 a las 11 a.m., para ingresar al laboratorio y desconectar el sistema. Por tanto, decimos que se realizó un único ensayo de 743 horas con duración de 32 días.

La temperatura ambiente en la cual se desarrollaron las pruebas fluctuó entre los 25 y 26°C, dentro del rango de temperatura que establece la norma ASTM G8 entre los 20 y 30°C. Todos los días, a excepción de los domingos y feriados, se hizo un monitoreo eléctrico, donde se tomaron los respectivos datos de potencial y corriente que exige la norma ASTM G8. Estos días también se hicieron observaciones con respecto al cambio que se daba en la superficie de los especímenes, así como también para controlar el nivel del electrolito por si había habido evaporación de agua, en cuyo caso se tenía que añadir agua para mantenerla al nivel inicial.

La tabla 4.4 muestra un cuadro con los días en los cuales la prueba se llevó a cabo, la hora en que se registraron los datos y los eventos que se observaron. Los cuadros con color azul, viernes 13 y lunes 13, son los días de inicio y final del ensayo respectivamente. En estos días también se hizo la toma de datos. El viernes 13,

inmediatamente después del inicio de las pruebas, se calibró el potencial en el rango exigido según la norma ASTM G8, éste se monitoreó sin calibrar hasta el día viernes 27, en donde se observó una disminución por debajo de los -1.400 V. A partir de ese día se volvió a calibrar el potencial para mantenerlo en el rango exigido. La figura 4.35 muestra con más detalle el color que se le ha designado a cada función.

Tabla 4.4. En la siguiente figura observamos los días en que se llevo acabo los ensayos.

Número	Día	Fecha	Hora	A	B	C	D
1	Viernes	13/10	5:00 p.m				
2	Sábado	14/10	9:30 a.m.				
3	Domingo	15/10					
4	Lunes	16/10	9:20 a.m.	X			X
5	Martes	17/10	9:30 a.m.				
6	Miércoles	18/10	9:30 a.m.				
7	Jueves	19/10	9:30 a.m.				
8	Viernes	20/10	9:30 a.m.				
9	Sábado	21/10	9:45 a.m.	X			
10	Domingo	22/10					
11	Lunes	23/10	9:30 a.m.	X			X
12	Martes	24/10	9:30 a.m.				
13	Miércoles	25/10	9:30 a.m.				
14	Jueves	26/10	5:20 p.m.	X			X
15	Viernes	27/10	5:20 p.m.		X		
16	Sábado	28/10	9:30 a.m.				X
17	Domingo	29/10					
18	Lunes	30/10	9:30 a.m.	X	X		
19	Martes	31/10	9:30 a.m.				X
20	Miércoles	1/11					
21	Jueves	2/11	5:20 p.m.	X	X		
22	Viernes	3/11	9:30 a.m.				
23	Sábado	4/11	9:30 a.m.				
24	Domingo	5/11					
25	Lunes	6/11	9:30 a.m.	X		X	
26	Martes	7/11	9:30 a.m.				
27	Miércoles	8/11	5:20 p.m.	X	X		
28	Jueves	9/11	5:20 p.m.				
29	Viernes	10/11	9:20 a.m.				
30	Sábado	11/11	9:30 a.m.	X			X
31	Domingo	12/11					
32	Lunes	13/11	9:20 a.m.				

A	<i>Adición de agua.</i>
B	<i>Aumento de potencial.</i>
C	<i>Disminución de potencial.</i>
D	<i>Observaciones de desprendimiento catódico¹⁰.</i>

¹⁰ Hace referencia a los indicios de desprendimiento catódico que se iban notando con la vista.

	<i>Días de inicio y término del ensayo.</i>
	<i>Días de toma de datos y observaciones.</i>
	<i>Días en que no se tomaron datos ni observaciones.</i>

Figura 4.36. Código de colores referido a la tabla 4.4.

4.4.3 Período de monitoreo.

Durante el período de monitoreo básicamente se toman los datos de la corriente total del sistema I1, del potencial total del sistema Et y del potencial polarizado E1 y E2 de cada espécimen de prueba. También se tuvo en cuenta la variación del potencial polarizado E2 de cada probeta, cada vez que éste variaba (disminuía o aumentaba) fuera del rango establecido por la norma ASTM G8. Cuando esto sucedía, primero se tomaba nota de los datos para poder analizarlos posteriormente, luego se corregía el potencial con ayuda del rectificador.

4.4.3.1 Medición del Potencial (E2) entre el espécimen y el electrodo de referencia.

El potencial polarizado E2 se midió con el voltímetro de alta resistencia para corriente directa, sumergiendo el electrodo de referencia Cu/CuSO₄ y colocándolo entre el espécimen y el ánodo de acero inoxidable. Esto se hizo todos los días a excepción de los domingos y feriados a partir del sábado 14/10. La primera toma que se hizo, el día que se inició el ensayo, es el potencial E1, el que me ocuparé de explicar líneas abajo.

También se registró una medida del potencial total del sistema Et, con el multímetro digital *data logger* PAN 9121. Esta medida se tomaba inmediatamente después de registrar los potenciales E2 y la corriente I1 durante todos los días hábiles. Este instrumento se conectó antes del inicio del ensayo y posteriormente se utilizaba para anotar el valor que éste mostraba.

4.4.3.2 Medición de la Corriente (I1).

La corriente I1 se midió con el multímetro *philips* PM 2521. Se tomaron medidas durante todos los días hábiles luego de registrar los potenciales E2. Como se menciona en el apartado 4.4.1.4 de este capítulo, el multímetro se conectó antes de iniciar el ensayo y posteriormente se utilizaba para anotar el valor que éste mostraba.

4.4.3.3 Medición del Potencial polarizado (E1).

El potencial E1 es el potencial registrado el primer día del ensayo y se midió con el voltímetro de alta resistencia para corriente directa, sumergiendo el electrodo de referencia Cu/CuSO₄. Antes de inyectarle corriente al sistema se hizo un registro del potencial para cada recipiente, llamado potencial de partida, luego se prendió el rectificador y se calibró el potencial del sistema en un rango de -1.45 y -1.5V, como exige la norma ASTM G8. Horas después de la primera calibración del potencial, se hizo el primer registro de éste a las 5:00 p.m. del 13/10, que sería el potencial E1 y luego se volvió a calibrar dejando a todas las probetas en el rango que exige la norma para poder registrar el potencial en los próximos días. Los datos registrados en los días siguientes como mencionamos antes, son los potenciales E2.

Los cálculos y resultados del apartado 4.4.3 junto con la interpretación y discusión de los mismos, se presentarán en el capítulo V.

4.4.4. Criterio de evaluación.

Por último, debemos mencionar que según la Norma ASTM G8, el criterio de evaluación que se tiene en cuenta para determinar el recubrimiento más resistente al desprendimiento catódico, es la cantidad del área del recubrimiento desprendido de las probetas, que se obtiene luego de culminar los ensayos.

En el capítulo V y en el anexo C, se muestran una serie de tablas con los cálculos aproximados de las áreas desnudas, en aquellas probetas afectadas por desprendimiento del recubrimiento.

Capítulo V

Cálculos y resultados.

5.1 Informe final.

La prueba de desprendimiento catódico, busca comparativamente determinar la resistencia al desprendimiento en los diferentes sistemas de recubrimientos anticorrosivos, aplicados sobre la superficie exterior de tuberías de acero enterradas, considerando además la aplicación de protección catódica. Se tienen en cuenta, algunos inconvenientes presentados durante la elaboración de las pruebas, el tipo de preparación superficial aplicada por el proveedor y los requerimientos de corriente; para determinar cuál de los recubrimientos resiste mejor al desprendimiento catódico. Este capítulo se ha dividido en dos partes. En la primera parte se hace una evaluación de cada espécimen luego de finalizar el ensayo; es decir, un examen físico y visual, para identificar si se han producido imperfecciones en el recubrimiento “*holidays*”, debido al desprendimiento catódico. Se han efectuado algunos cálculos con relación a las imperfecciones identificadas, para luego hacer una recopilación de todos los datos de interés considerados en el apartado 4.4.3 del capítulo IV; allí descritos. En la segunda parte se han elaborado algunos gráficos con su respectiva descripción, empleando los datos obtenidos en el apartado 5.1.1; éstos presentan en forma gráfica, los resultados obtenidos en este trabajo.

5.1.1 Medición y recopilación de datos.

5.1.1.1 Identificación del espécimen.

En este apartado se hace un examen visual del aspecto físico de cada espécimen de prueba. Este examen se hizo de forma minuciosamente y con sumo cuidado, teniendo como base la norma ASTM G8. A continuación se describe este proceso.

Primeramente se desconectó cada probeta del sistema, empezando por la última fila de la bandeja C. La probeta es luego lavada con agua corriente, para eliminar la capa de sales presentes en la superficie sumergida, debido a las sales disueltas en el agua donde estuvieron sumergidas durante el ensayo. Este procedimiento se lleva a cabo muy suavemente, para evitar dañar la evidencia que se pudiera encontrar sobre la superficie de las probetas.

Luego se lleva a cabo un examen visual en cada una de las probetas, para ubicar los “*holidays*” que fueran visibles, formados por el desprendimiento catódico. Posteriormente, con el tacto y dando pequeños golpecitos con la yema de un dedo de la mano, se procedió a analizar el área sumergida de las probetas que no tenían ampollas. La evaluación se hizo con mayor cuidado alrededor de las fallas artificiales hechas inicialmente con el taladro, pues es en esta zona donde se presenta el desprendimiento catódico. En algunas probetas se pudo observar algunos indicios de desprendimiento catódico, pues se notó que la pintura estaba ligeramente levantada. Asimismo, en otros casos, se observaron probetas que no sufrieron efectos después de haber terminado el período del ensayo.

Posteriormente se hizo una prueba, con el “*holiday detector*” a todas las probetas, incluyendo aquellas que finalizaron el ensayo aparentemente sin defectos. Por último, con un cuchillo afilado, manipulado cuidadosamente, como indica la norma ASTM G8, se comenzó a despegar la pintura alrededor de las fallas artificiales con el propósito de retirar el recubrimiento que estaba dañado y que se levantase fácilmente, despegado de la superficie metálica debido al desprendimiento catódico, mostrando ampollas en algunas probetas y, en otras, indicio de este fenómeno. Posteriormente se calculó, el área totalmente desnuda de la probeta. Esta prueba se hizo para evaluar la magnitud del daño final que ocasionó el desprendimiento catódico en cada probeta, y a la vez para descartar en todos los especímenes, los efectos del mencionado fenómeno; debido a que algunas probetas aparentemente finalizaron el ensayo sin fallas; sin embargo, esta prueba demostró lo contrario¹.

Las probetas que sufrieron “*holidays*” visibles, fueron la G8-04e, G8-05e y G8-06e (ver figura 5.4). A continuación se muestra una serie de tablas, donde se presenta el diámetro y el área de cada uno de los “*holidays*” presentes, en las mencionadas probetas:

¹ Cfr. Anexo D.

Tabla 5.1. Resultados del examen físico de la parte frontal de la probeta G8-04e.

EXAMEN FÍSICO			
<i>Probetas</i>	<i>Parte Frontal</i>		
	<i>No. de Holidays</i>	<i>Diámetro (mm) Holidays</i>	<i>Área (mm²) Holidays</i>
<i>G8-04e Falla Superior</i>	1	1.9	2.835
	2	1.9	2835
	3	2	3.141
	4	2.1	3.463
	5	2.5	4.908
	6	2.5	4.908
	7	2.5	4.908
	8	2.9	6.605
	9	3	7.068
	10	3	7.068
	11	3.5	9.621
	12	4	12.566
	13	4.1	13.202
	14	4.2	13.854
	15	4.5	15.904
	16	1.5	213.82
<i>G8-04e Falla Inferior</i>	1	3.1	7.547
	2	3.9	11.945
	3	5.1	20.428
	4	5.5	23.758
	5	6.5	33.183
	6	7.1	39.591
Total	22	92.3	463.172

Tabla 5.2. Resultados del examen físico de la parte posterior de la probeta G8-04e.

EXAMEN FÍSICO			
<i>Probetas</i>	<i>Parte Posterior</i>		
	<i>No. de Holidays</i>	<i>Diámetro (mm) Holidays</i>	<i>Área (mm²) Holidays</i>
<i>G8-04e</i>	1	2.1	3.463
	2	2.1	3.463
	3	2.5	4.908
	4	3	7.068
	5	3.5	9.621
	6	5	19.634
	7	7	38.484
	8	9.5	70.882
Total	8	34.7	157.527

Tabla 5.3. Resultados de examen físico de la parte frontal de la probeta G8-05e.

EXAMEN FÍSICO			
<i>Probetas</i>	<i>Parte Frontal</i>		
	<i>No. de Holidays</i>	<i>Diámetro (mm) Holidays</i>	<i>Área (mm²) Holidays</i>
<i>G8-05e Falla Superior</i>	1	2.5	4.908
	2	3	7.068
	3	3	7.068
	4	3.1	7.547
	5	3.5	9.621
	6	3.5	9.621
	7	3.5	9.621
	8	4.1	13.202
	9	4.5	15.904
	10	4.9	18.857
<i>G8-05e Falla Inferior</i>	1	1.1	0.950
	2	2	3.141
	3	2.1	3.463
	4	3	7.068
	5	3	7.068
	6	3.5	9.621
	7	3.9	6.605
	8	3.9	6.605
	9	4	12.566
	10	4	12.566
	11	4.1	13.202
	12	4.1	13.202
	13	5.5	23.758
	14	6.5	33.183
Total	24	86.3	256.424

En esta probeta también se pudo observar que aproximadamente un 60% de la superficie frontal presentaba “*holidays*” muy pequeños, cuyos diámetros eran menores a 1mm.

Tabla 5.4. Resultados del examen físico de la parte posterior de la probeta G8-05e.

EXAMEN FÍSICO			
<i>Probetas</i>	<i>Parte Posterior</i>		
	<i>No. de Holidays</i>	<i>Diámetro (mm) Holidays</i>	<i>Área (mm²) Holidays</i>
<i>G8-05e</i>	1	1.5	1.767
	2	2	3.141
	3	2.9	6.605
	4	3	7.068
	5	4.1	13.202
	6	4.5	15.904
	7	4.5	15.904
	8	8	50.265
	9	10.9	93.313
Total	9	41.4	207.172

Tabla 5.5. Resultados del examen físico de la parte frontal de la probeta G8-06e.

EXAMEN FÍSICO			
<i>Probetas</i>	<i>Parte Frontal</i>		
	<i>No. de Holidays</i>	<i>Diámetro (mm) Holidays</i>	<i>Área (mm²) Holidays</i>
<i>G8-06e Falla Superior</i>	1	2.1	3.463
	2	3	7.068
	3	3	7.068
	4	3	7.068
	5	3.5	9.621
	6	4	12.566
	7	4.5	15.904
	8	6.9	37.392
<i>G8-06e Falla Inferior</i>	1	2.9	6.605
	2	3	7.068
	3	3	7.068
	4	3	7.068
	5	4	12.566
	6	4.1	13.202
	7	4.5	15.904
Total	15	54.5	169.638

La tabla que se presenta seguidamente, muestra las áreas máximas y mínimas así como el promedio de éstas. Esto se hizo para cada una de las probetas que presentaron “*holidays*”, cuyos datos se han expuesto en las tablas anteriores.

**Tabla 5.6. Resultados de los exámenes físicos de las probetas defectuosas.
Área máxima, mínima y promedio.**

<i>Probeta</i>	<i>Máxima área</i>	<i>Mínima área</i>	<i>Promedio</i>
<i>G8-04e Parte frontal</i>	213.824	2.835	21.053
<i>G8-04e Parte posterior</i>	70.882	3.463	19.690
<i>G8-05e Parte frontal</i>	33.183	0.950	10.684
<i>G8-05e Parte posterior</i>	93.313	1.767	23.019
<i>G8-06e Parte frontal</i>	37.392	3.463	11.309

De la tabla 5.6, podemos deducir que la parte frontal de la probeta G8-0,4e fue la más dañada, lo contrario ocurrió con la parte frontal de la probeta G8-05e. Sin embargo, en promedio, la probeta G8-05e fue la más dañada en comparación a la G8-04e y G8-06e, luego de realizada la prueba de desprendimiento catódico.

Las probetas G8-34e y G8-36e también mostraron fallas, aunque éstas fueron muy superiores a las antes examinadas. En este caso, se formó una ampolla grande que cubría casi toda la superficie sumergida, incluso se mostró afectada también, la superficie que se encontraba por encima del nivel de agua. En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se puede observar la magnitud del daño.

Cuando se hizo el examen físico mediante el tacto, resultaron con fallas las siguientes probetas²:

- G8-10e, con un levantamiento en el borde de la falla artificial de la parte frontal y un levantamiento en la falla superior e inferior de la parte posterior.
- G8-11e, con un levantamiento en la falla superior e inferior de la parte frontal y en el borde de la falla artificial de la parte posterior.
- G8-12e, con un levantamiento en la falla superior de la parte frontal y en el borde de la falla artificial de la parte posterior.
- G8-16e, con un levantamiento en la falla superior e inferior de la parte frontal y en el borde de la falla artificial de la parte posterior.
- G8-17e, con un levantamiento en el borde de la falla artificial de la parte frontal y con un gran levantamiento alrededor de las fallas artificial superior e inferior de la parte posterior.
- G8-18e, con un levantamiento en el borde de la falla artificial de la parte frontal y en el borde de la falla artificial superior e inferior de la parte posterior.

² Cfr. Anexo C.

- G8-29e, con un levantamiento en el borde de la falla artificial superior e inferior de la parte frontal.
- G8-40e, con un leve levantamiento en los bordes de la falla artificial superior e inferior de la parte frontal.
- G8-41e, con un levantamiento en los bordes de la falla artificial superior e inferior y en el borde de la falla artificial de la parte posterior.
- G8-42e, con un levantamiento en los bordes de la falla artificial superior y en el borde de la falla artificial de la parte posterior.

Luego se efectuaron las pruebas con el “*holiday detector*”, donde resultaron defectuosas las siguientes probetas: G8-04e, con fallas alrededor de la falla artificial superior (parte frontal), G8-05e, con fallas alrededor de la falla artificial superior e inferior (parte frontal) y G8-06e, con fallas alrededor de la falla artificial superior (parte frontal).

En el anexo C, se muestran tabulados los resultados de los cálculos de las áreas de las superficies desnudas en las probetas afectadas, van acompañadas con fotografías tomadas en las secciones dañadas de los especímenes, ilustrando así los resultados. Aquí se pueden observar todas las probetas afectadas al finalizar el ensayo.

Por último se hizo un registro de la corriente de protección requerida para cada recubrimiento. Al finalizar el ensayo, se tomó como área de prueba una sección circular, del área no sumergida del espécimen, a excepción del proveedor 4. En éste caso una parte de la tubería del área no expuesta al ensayo, se sumergió en la solución. Los datos registrados de la corriente de protección se encuentran en el anexo E, junto a las fotos que se tomaron donde se aprecia el procedimiento que se realizó para medir la corriente. Con los datos de la corriente de protección se pudo calcular además la densidad de corriente de protección, los cuales también se encuentran en las tablas que están en el anexo E. Estos datos fueron necesarios para conocer con exactitud, cuál recubrimiento requería más o menos corriente de protección, y tomando en cuenta los datos registrados durante el ensayo y el examen físico, descrito anteriormente, llegar a un diagnóstico final.



Figura 5.1. En esta figura se muestra la probeta G8-34e el día que terminó el ensayo.



Figura 5.3. En esta figura se muestra la probeta G8-36e el día en que terminó el ensayo. Podemos ver como la parte no sumergida también sufrió daños.

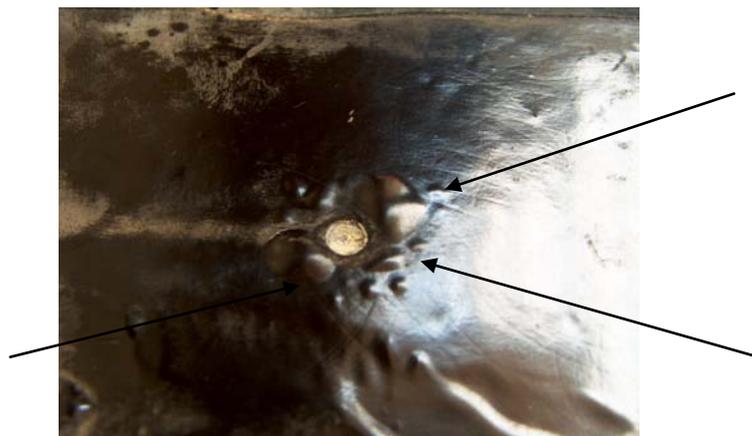


Figura 5.4. En esta figura mostramos el desprendimiento catódico en una de las probetas que sufrió este daño.

5.1.1.2 Resistencia eléctrica relativa en los especímenes de prueba.

La medida de la resistencia eléctrica relativa en los especímenes, antes de dar inicio a las pruebas, dio como resultado 10.00 mΩ en todos los casos. La lectura en esta prueba debería ser no menor a 10.00 mΩ, pero una lectura estable por debajo de 10.00 mΩ; no indica la presencia de fallas en la capa, en consecuencia el espécimen puede ser usado en el ensayo. Esta prueba se llevó a cabo antes de iniciar el ensayo y mucho antes de practicar las fallas artificiales, en las probetas; para verificar la continuidad de la capa de recubrimiento. Esta prueba se realizó con un multímetro, y los resultados obtenidos los podemos ver recopilados en el anexo D.

5.1.1.3 Resultados en el inicio, durante y al final del ensayo de exposición.

En este apartado, presentamos los datos de magnitudes eléctricas registrados desde el inicio y hasta el término del ensayo como son: el potencial E2, el potencial E1, el potencial Et y la corriente I1 (ver definición en el apartado 4.4.3 del capítulo IV). Con estos datos se hicieron ciertos cálculos como son: la diferencia de potencial el máximo, el mínimo y el promedio del potencial E2, el potencial total Et y la corriente I1, para cada probeta. También se calculó la densidad de corriente del sistema δ , para cada día en el que se hizo el registro de datos. Los datos y cálculos se presentan ordenados en tablas que se exponen en los siguientes apartados. Antes de pasar al siguiente apartado colocaremos a continuación los potenciales de partida que se tomaron en el inicio del ensayo y analizaremos, según lo visto en el apartado 1.1.5 del capítulo I, si antes de imprimir la corriente las probetas estaban protegidas o no:

Bandeja A: -0.567 V → Valor neto durante la medida = 0.917 > 0.85 V

Bandeja B: -0.575 V → Valor neto durante la medida = 0.925 > 0.85 V

Bandeja C: -0.535 V → Valor neto durante la medida = 0.885 > 0.85 V

Como podemos observar, estos potenciales de partida indican que los especímenes estaban protegidos contra la corrosión al momento de iniciar el ensayo, debido a que el valor neto durante la medida ($E = E_{Cu} - E_{Fe}$) supera a 0,85 V; como mencionamos en el capítulo I, si se daba esto la superficie metálica está protegida contra la corrosión.

A) Resultados del potencial E1 y E2.

Primeramente se presentan tabulados los datos registrados del potencial E1 (primer día) y E2 para cada una de las probetas. Los datos se tomaron durante 26 días hábiles de los 32 en los que se llevó a cabo la prueba (En los días hábiles no se han incluido los domingos y feriados que se encuentran en el período de prueba, pues la norma permite que no se haga un registro de datos en estos días). En este apartado se muestran dos tablas, en la primera columna se incluye el código del proveedor y en la segunda columna, las probetas que pertenecen a ese proveedor. En cada una de las siguientes trece columnas, se muestran los potenciales que se tomaron indicando el día y la fecha.

Tabla 5.7. Datos del potencial E1 del Viernes 13/10 y de E2 del Sábado 14/10 al Viernes 27/10.

Cód. Prov.	Prob.	FECHA												
		Viernes 13/10	Sábado 14/10	Lunes 16/10	Martes 17/10	Miércoles 18/10	Jueves 19/10	Viernes 20/10	Sábado 21/10	Lunes 23/10	Martes 24/10	Miércoles 25/10	Jueves 26/10	Viernes 27/10
		E1 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)
1	G8-04e	-1.472	-1.468	-1.424	-1.414	-1.437	-1.44	-1.428	-1.416	-1.414	-1.401	-1.401	-1.387	-1.5
	G8-05e	-1.471	-1.466	-1.423	-1.427	-1.442	-1.446	-1.442	-1.422	-1.419	-1.401	-1.405	-1.387	-1.499
	G8-06e	-1.476	-1.468	-1.427	-1.426	-1.441	-1.448	-1.433	-1.422	-1.417	-1.399	-1.403	-1.387	-1.5
2	G8-10e	-1.478	-1.472	-1.433	-1.426	-1.452	-1.451	-1.437	-1.421	-1.426	-1.409	-1.409	-1.392	-1.48
	G8-11e	-1.476	-1.469	-1.429	-1.416	-1.434	-1.434	-1.422	-1.412	-1.41	-1.393	-1.393	-1.377	-1.462
	G8-12e	-1.474	-1.47	-1.423	-1.414	-1.429	-1.431	-1.417	-1.407	-1.401	-1.383	-1.384	-1.376	-1.452
3	G8-16e	-1.48	-1.472	-1.435	-1.423	-1.438	-1.443	-1.426	-1.421	-1.422	-1.404	-1.404	-1.39	-1.483
	G8-17e	-1.469	-1.462	-1.42	-1.413	-1.425	-1.423	-1.411	-1.402	-1.401	-1.38	-1.381	-1.366	-1.445
	G8-18e	-1.466	-1.464	-1.414	-1.408	-1.417	-1.415	-1.404	-1.395	-1.387	-1.373	-1.373	-1.356	-1.437
7	G8-40e	-1.458	-1.454	-1.392	-1.373	-1.386	-1.39	-1.38	-1.368	-1.357	-1.348	-1.348	-1.334	-1.47
	G8-41e	-1.456	-1.45	-1.388	-1.363	-1.377	-1.38	-1.376	-1.364	-1.353	-1.346	-1.346	-1.334	-1.468
	G8-42e	-1.459	-1.452	-1.394	-1.368	-1.377	-1.376	-1.372	-1.359	-1.344	-1.335	-1.337	-1.326	-1.447
8	G8-46e	-1.46	-1.456	-1.393	-1.374	-1.389	-1.385	-1.378	-1.368	-1.359	-1.351	-1.351	-1.336	-1.465
	G8-47e	-1.457	-1.453	-1.388	-1.364	-1.367	-1.37	-1.363	-1.352	-1.342	-1.34	-1.34	-1.327	-1.452
	G8-48e	-1.457	-1.456	-1.388	-1.366	-1.366	-1.362	-1.363	-1.348	-1.337	-1.327	-1.327	-1.316	-1.432
5	G8-28e	-1.454	-1.448	-1.383	-1.367	-1.38	-1.378	-1.365	-1.354	-1.351	-1.344	-1.345	-1.332	-1.502
	G8-29e	-1.448	-1.444	-1.373	-1.347	-1.36	-1.36	-1.358	-1.343	-1.336	-1.329	-1.329	-1.318	-1.474
	G8-30e	-1.444	-1.439	-1.373	-1.353	-1.356	-1.355	-1.353	-1.343	-1.328	-1.322	-1.322	-1.312	-1.469
6	G8-34e	-1.406	-1.402	-1.452	-1.426	-1.454	-1.438	-1.435	-1.421	-1.43	-1.402	-1.399	-1.386	-1.468
	G8-35e	-1.48	-1.474	-1.437	-1.42	-1.445	-1.427	-1.425	-1.41	-1.412	-1.394	-1.38	-1.379	-1.454
	G8-36e	-1.478	-1.474	-1.435	-1.416	-1.443	-1.426	-1.423	-1.411	-1.412	-1.391	-1.377	-1.377	-1.46
4	G8-C1e	-1.479	-1.474	-1.449	-1.419	-1.452	-1.437	-1.31	-1.415	-1.423	-1.388	-1.39	-1.381	-1.466
	G8-C2e	-1.474	-1.47	-1.438	-1.413	-1.438	-1.426	-1.42	-1.408	-1.414	-1.388	-1.382	-1.376	-1.458
	G8-C3e	-1.476	-1.471	-1.437	-1.414	-1.437	-1.425	-1.419	-1.408	-1.414	-1.388	-1.381	-1.374	-1.459

Tabla 5.8. Datos del potencial E2 del Sábado 28/10 al Lunes 13/10.

Cód. Prov.	Prob.	FECHA													
		Sábado 28/10	Lunes 30/10	Martes 31/10	Jueves 2/11	Viernes 3/11	Sábado 4/11	Lunes 6/11	Martes 7/11	Miércoles 8/11	Jueves 9/11	Viernes 10/11	Sábado 11/11	Lunes 13/11	
		E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	E2 (V)	
1	G8-04e	-1.478	-1.512	-1.516	-1.512	-1.528	-1.519	-1.537	-1.537	-1.515	-1.575	-1.565	-1.566	-1.529	
	G8-05e	-1.483	-1.518	-1.524	-1.524	-1.534	-1.523	-1.544	-1.538	-1.507	-1.575	-1.56	-1.568	-1.53	
	G8-06e	-1.472	-1.514	-1.516	-1.514	-1.526	-1.513	-1.534	-1.528	-1.497	-1.563	-1.551	-1.559	-1.523	
2	G8-10e	-1.487	-1.526	-1.529	-1.518	-1.525	-1.519	-1.536	-1.536	-1.508	-1.576	-1.564	-1.561	-1.503	
	G8-11e	-1.461	-1.496	-1.498	-1.494	-1.504	-1.496	-1.507	-1.507	-1.479	-1.538	-1.53	-1.532	-1.488	
	G8-12e	-1.451	-1.482	-1.488	-1.491	-1.498	-1.495	-1.507	-1.498	-1.476	-1.533	-1.52	-1.534	-1.488	
3	G8-16e	-1.485	-1.521	-1.423	-1.514	-1.519	-1.518	-1.527	-1.527	-1.508	-1.565	-1.558	-1.552	-1.494	
	G8-17e	-1.443	-1.476	-1.477	-1.47	-1.482	-1.474	-1.481	-1.479	-1.459	-1.516	-1.507	-1.508	-1.461	
	G8-18e	-1.43	-1.456	-1.462	-1.458	-1.462	-1.462	-1.467	-1.467	-1.445	-1.5	-1.491	-1.489	-1.45	
7	G8-40e	-1.454	-1.484	-1.475	-1.463	-1.469	-1.464	-1.471	-1.463	-1.443	-1.489	-1.479	-1.476	-1.432	
	G8-41e	-1.431	-1.459	-1.461	-1.447	-1.456	-1.455	-1.462	-1.455	-1.434	-1.476	-1.473	-1.478	-1.451	
	G8-42e	-1.422	-1.45	-1.448	-1.439	-1.456	-1.448	-1.451	-1.444	-1.444	-1.464	-1.458	-1.463	-1.425	
8	G8-46e	-1.463	-1.456	-1.457	-1.448	-1.453	-1.452	-1.447	-1.449	-1.43	-1.468	-1.452	-1.467	-1.413	
	G8-47e	-1.436	-1.432	-1.444	-1.428	-1.439	-1.437	-1.435	-1.43	-1.415	-1.444	-1.44	-1.446	-1.414	
	G8-48e	-1.42	-1.422	-1.421	-1.41	-1.421	-1.415	-1.415	-1.41	-1.391	-1.42	-1.42	-1.43	-1.396	
5	G8-28e	-1.53	-1.438	-1.448	-1.434	-1.445	-1.447	-1.432	-1.442	-1.423	-1.449	-1.443	-1.437	-1.397	
	G8-29e	-1.425	-1.412	-1.42	-1.413	-1.422	-1.415	-1.411	-1.408	-1.388	-1.43	-1.412	-1.428	-1.381	
	G8-30e	-1.415	-1.41	-1.415	-1.406	-1.413	-1.415	-1.408	-1.4	-1.385	-1.411	-1.41	-1.417	-1.385	
6	G8-34e	-1.48	-1.509	-1.506	-1.474	-1.503	-1.486	-1.492	-1.495	-1.467	-1.509	-1.491	-1.486	-1.45	
	G8-35e	-1.485	-1.499	-1.498	-1.467	-1.491	-1.476	-1.477	-1.486	-1.459	-1.498	-1.481	-1.476	-1.443	
	G8-36e	-1.493	-1.492	-1.49	-1.46	-1.487	-1.47	-1.476	-1.483	-1.46	-1.498	-1.481	-1.473	-1.441	
4	G8-C1e	-1.479	-1.507	-1.508	-1.476	-1.494	-1.482	-1.487	-1.498	-1.468	-1.509	-1.498	-1.486	-1.449	
	G8-C2e	-1.483	-1.496	-1.498	-1.462	-1.487	-1.474	-1.475	-1.495	-1.464	-1.5	-1.483	-1.478	-1.443	
	G8-C3e	-1.494	-1.495	-1.492	-1.457	-1.482	-1.468	-1.472	-1.489	-1.459	-1.497	-1.482	-1.475	-1.44	

B) Cálculos realizados con el potencial E2.

La tabla 5.9 que se muestra a continuación, expone los valores máximos, mínimos y el promedio total para el potencial E2, empleando los datos obtenidos durante los 26 días hábiles de duración de la prueba, según las tablas 5.7 y 5.8. Esta tabla muestra una columna con el código del proveedor y otra con las probetas que le corresponden, luego hay tres columnas con los datos anteriormente descritos que se asignan a cada espécimen. Para finalizar también se puede observar que las tres últimas filas de esta tabla muestran los valores máximos, mínimos y el promedio de cada una de las tres columnas finales.

Tabla 5.9. Datos máximos, mínimos y promedio total del potencial E1 para cada probeta.

<i>Código Proveedor</i>	<i>Probetas</i>	<i>Máximo E2 (V)</i>	<i>Mínimo E2 (V)</i>	<i>Promedio total</i>
1	<i>G8-04e</i>	-1.575	-1.387	-1.480
	<i>G8-05e</i>	-1.575	-1.387	-1.483
	<i>G8-06e</i>	-1.563	-1.387	-1.479
2	<i>G8-10e</i>	-1.576	-1.392	-1.483
	<i>G8-11e</i>	-1.538	-1.377	-1.463
	<i>G8-12e</i>	-1.534	-1.376	-1.458
3	<i>G8-16e</i>	-1.565	-1.39	-1.475
	<i>G8-17e</i>	-1.516	-1.366	-1.447
	<i>G8-18e</i>	-1.5	-1.356	-1.436
7	<i>G8-40e</i>	-1.489	-1.334	-1.427
	<i>G8-41e</i>	-1.478	-1.334	-1.420
	<i>G8-42e</i>	-1.464	-1.326	-1.413
8	<i>G8-46e</i>	-1.468	-1.336	-1.426
	<i>G8-47e</i>	-1.457	-1.327	-1.059
	<i>G8-48e</i>	-1.457	-1.316	-1.393
5	<i>G8-28e</i>	-1.53	-1.332	-1.414
	<i>G8-29e</i>	-1.474	-1.318	-1.391
	<i>G8-30e</i>	-1.469	-1.312	-1.386
6	<i>G8-34e</i>	-1.509	-1.386	-1.456
	<i>G8-35e</i>	-1.499	-1.379	-1.452
	<i>G8-36e</i>	-1.498	-1.377	-1.451
4	<i>G8-C1e</i>	-1.509	-1.31	-1.454
	<i>G8-C2e</i>	-1.5	-1.376	-1.451
	<i>G8-C3e</i>	-1.497	-1.374	-1.450
Máximo		-1.576	-1.392	-1.483
Mínimo		-1.457	-1.312	-1.391
Promedio		-1.51	-1.356	-1.441

C) Variación del potencial.

Primeramente mostraremos dos tablas donde se presenta la variación de potencial ΔE . La primera tabla 5.10 tiene doce columnas y la segunda tabla 5.11 tiene trece columnas, al igual que las tablas del apartado A. En la primera y en la segunda columna se muestran el código del proveedor y las probetas que le corresponden respectivamente. En las doce y trece columnas siguientes respectivamente, se muestra la variación del potencial ΔE por cada día, indicando la fecha en que se hizo el monitoreo. En la tercera columna de la tabla 5.7 se encuentra el potencial E1. El primer dato de la variación de potencial se obtiene restando E1 (potencial tomado el primer día), menos el primer potencial E2 registrado el día sábado 14/10, el segundo dato se obtiene tomando E1 menos el potencial E2 registrado en el día correspondiente y así sucesivamente. Esto se evaluó para cuantificar la variación del potencial con respecto al primer día del ensayo y poder monitorearlo.

Un valor positivo de ΔE indica que el valor que se registró del potencial E2 es más negativo que el valor que se registró del potencial E1, es decir que el potencial E2 en comparación al potencial E1 del primer día, se incrementó en valor absoluto, caso contrario cuando se encuentra un valor negativo de ΔE . En algunos casos en las tablas también se observan valores nulos (cero), esto quiere decir que no hubo variación en el potencial.

Posteriormente se consideró conveniente elaborar dos tablas adicionales, las tablas 5.12 y 5.13, donde se muestra el ΔE_2 calculado entre un día y el día sucesivo. El cálculo se hizo restando dos días hábiles consecutivos ($\Delta E_2 = E_2 - E_{2_1}$) desde el día 13/10 (inicio de la prueba) hasta el día 13/11 (término de la prueba). En las tablas se pueden apreciar valores positivos y valores negativos de ΔE_2 . Los valores de E2 utilizados son aquellos de las tablas 5.7 y 5.8.

Por ejemplo, para la tabla 5.12 el día viernes 13/10 es E_{2_1} y el día sábado 14/10 es E_2 (ver los potenciales de E2 de la tercera y cuarta columna de la tabla 5.7), la resta de potenciales registrados en estos dos días, dará como resultado ΔE_2 de la primera columna y así sucesivamente se calcularán los ΔE_2 hasta el final.

Tabla 5.10. Variación de potencial ΔE .

Cód. Prov.	Prob.	Variación de Potencial											
		<i>EI y</i> 14/10	<i>EI y</i> 16/10	<i>EI y</i> 17/10	<i>EI y</i> 18/10	<i>EI y</i> 19/10	<i>EI y</i> 20/10	<i>EI y</i> 21/10	<i>EI y</i> 23/10	<i>EI y</i> 24/10	<i>EI y</i> 25/10	<i>EI y</i> 26/10	<i>EI y</i> 27/10
		$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$
1	G8-04e	0.004	0.048	0.058	0.035	0.032	0.044	0.056	0.058	0.071	0.071	0.085	-0.113
	G8-05e	0.005	0.048	0.044	0.029	0.025	0.029	0.049	0.052	0.07	0.066	0.084	-0.112
	G8-06e	0.008	0.049	0.05	0.035	0.028	0.043	0.054	0.059	0.077	0.073	0.089	-0.113
2	G8-10e	0.006	0.045	0.052	0.026	0.027	0.041	0.057	0.052	0.069	0.069	0.086	-0.088
	G8-11e	0.007	0.047	0.06	0.042	0.042	0.054	0.064	0.066	0.083	0.083	0.099	-0.085
	G8-12e	0.004	0.051	0.06	0.045	0.043	0.057	0.067	0.073	0.091	0.09	0.098	-0.076
3	G8-16e	0.008	0.045	0.057	0.042	0.037	0.054	0.059	0.058	0.076	0.076	0.09	-0.093
	G8-17e	0.007	0.049	0.056	0.044	0.046	0.058	0.067	0.068	0.089	0.088	0.103	-0.079
	G8-18e	0.002	0.052	0.058	0.049	0.051	0.062	0.071	0.079	0.093	0.093	0.11	-0.083
7	G8-40e	0.004	0.066	0.085	0.072	0.068	0.078	0.09	0.101	0.11	0.11	0.124	-0.136
	G8-41e	0.006	0.068	0.093	0.079	0.076	0.08	0.092	0.103	0.11	0.11	0.122	-0.134
	G8-42e	0.007	0.065	0.091	0.082	0.083	0.087	0.1	0.115	0.124	0.122	0.133	-0.081
8	G8-46e	0.004	0.067	0.086	0.071	0.075	0.082	0.092	0.101	0.109	0.109	0.124	-0.109
	G8-47e	0.004	0.069	0.093	0.09	0.087	0.094	0.105	0.115	0.117	0.117	0.13	-0.125
	G8-48e	0.001	0.069	0.091	0.091	0.095	0.094	0.109	0.12	0.13	0.13	0.141	-0.016
5	G8-28e	0.006	0.071	0.087	0.074	0.076	0.089	0.1	0.103	0.11	0.109	0.122	-0.17
	G8-29e	0.004	0.075	0.101	0.088	0.088	0.09	0.105	0.112	0.119	0.119	0.13	-0.156
	G8-30e	0.005	0.071	0.091	0.088	0.089	0.091	0.101	0.116	0.122	0.122	0.132	-0.157
6	G8-34e	0.004	-0.046	-0.02	-0.048	-0.032	-0.029	-0.015	-0.024	0.004	0.007	0.02	-0.082
	G8-35e	0.006	0.043	0.06	0.035	0.053	0.055	0.07	0.068	0.086	0.1	0.101	-0.075
	G8-36e	0.004	0.043	0.062	0.035	0.052	0.055	0.067	0.066	0.087	0.101	0.101	-0.083
4	G8-C1e	0.005	0.03	0.06	0.027	0.042	0.169	0.064	0.056	0.091	0.089	0.098	-0.085
	G8-C2e	0.004	0.036	0.061	0.036	0.048	0.054	0.066	0.06	0.086	0.092	0.098	0.018
	G8-C3e	0.005	0.039	0.062	0.039	0.051	0.057	0.068	0.062	0.088	0.095	0.102	0.015

Tabla 5.11. Variación de potencial ΔE .

Cód. Prov.	Prob.	Variación de Potencial												
		E1 y 28/10	E1 y 30/10	E1 y 31/10	E1 y 2/11	E1 y 3/11	E1 y 4/11	E1 y 6/11	E1 y 7/11	E1 y 8/11	E1 y 9/11	E1 y 10/11	E1 y 11/11	E1 y 13/11
		$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$	$\Delta E(V)$
1	G8-04e	-0.006	-0.04	-0.044	-0.04	-0.056	-0.047	-0.065	-0.065	-0.043	-0.103	-0.093	-0.094	-0.057
	G8-05e	-0.012	-0.047	-0.053	-0.053	-0.063	-0.052	-0.073	-0.067	-0.036	-0.104	-0.089	-0.097	-0.059
	G8-06e	0.004	-0.038	-0.04	-0.038	-0.05	-0.037	-0.058	-0.052	-0.021	-0.087	-0.075	-0.083	-0.047
2	G8-10e	-0.009	-0.048	-0.051	-0.04	-0.047	-0.041	-0.058	-0.058	-0.03	-0.098	-0.086	-0.083	-0.025
	G8-11e	0.015	-0.02	-0.022	-0.018	-0.028	-0.02	-0.031	-0.031	-0.003	-0.062	-0.054	-0.056	-0.012
	G8-12e	0.023	-0.008	-0.014	-0.017	-0.024	-0.021	-0.033	-0.024	-0.002	-0.059	-0.046	-0.06	-0.014
3	G8-16e	-0.005	-0.041	0.057	-0.034	-0.039	-0.038	-0.047	-0.047	-0.028	-0.085	-0.078	-0.072	-0.014
	G8-17e	0.026	-0.007	-0.008	-0.001	-0.013	-0.005	-0.012	-0.01	0.01	-0.047	-0.038	-0.039	0.008
	G8-18e	0.036	0.01	0.004	0.008	0.004	0.004	-0.001	-0.001	0.021	-0.034	-0.025	-0.023	0.016
7	G8-40e	0.004	-0.026	-0.017	-0.005	-0.011	-0.006	-0.013	-0.005	0.015	-0.031	-0.021	-0.018	0.026
	G8-41e	0.025	-0.003	-0.005	0.009	0	0.001	-0.006	0.001	0.022	-0.02	-0.017	-0.022	0.005
	G8-42e	0.037	0.009	0.011	0.02	0.003	0.011	0.008	0.015	0.015	-0.005	0.001	-0.004	0.034
8	G8-46e	-0.003	0.004	0.003	0.012	0.007	0.008	0.013	0.011	0.03	-0.008	0.008	-0.007	0.047
	G8-47e	0.021	0.025	0.013	0.029	0.018	0.02	0.022	0.027	0.042	0.013	0.017	0.011	0.043
	G8-48e	0.037	0.035	0.036	0.047	0.036	0.042	0.042	0.047	0.066	0.037	0.037	0.027	0.061
5	G8-28e	-0.076	0.016	0.006	0.02	0.009	0.007	0.022	0.012	0.031	0.005	0.011	0.017	0.057
	G8-29e	0.023	0.036	0.028	0.035	0.026	0.033	0.037	0.04	0.06	0.018	0.036	0.02	0.067
	G8-30e	0.029	0.034	0.029	0.038	0.031	0.029	0.036	0.044	0.059	0.033	0.034	0.027	0.059
6	G8-34e	-0.074	-0.103	-0.1	-0.068	-0.097	-0.08	-0.086	-0.089	-0.061	-0.103	-0.085	-0.08	-0.044
	G8-35e	-0.005	-0.019	-0.018	0.013	-0.011	0.004	0.003	-0.006	0.021	-0.018	-0.001	0.004	0.037
	G8-36e	-0.015	-0.014	-0.012	0.018	-0.009	0.008	0.002	-0.005	0.018	-0.02	-0.003	0.005	0.037
4	G8-C1e	0	-0.028	-0.029	0.003	-0.015	-0.003	-0.008	-0.019	0.011	-0.03	-0.019	-0.007	0.03
	G8-C2e	-0.009	-0.022	-0.024	0.012	-0.013	0	-0.001	-0.021	0.01	-0.026	-0.009	-0.004	0.031
	G8-C3e	-0.018	-0.019	-0.016	0.019	-0.006	0.008	0.004	-0.013	0.017	-0.021	-0.006	0.001	0.036

Tabla 5.12. Variación de potencial $\Delta E2$.

Cód. Prov.	Prob.	Variación de Potencial											
		13/10 y 14/10	14/10 y 16/10	16/10 y 17/10	17/10 y 18/10	18/10 y 19/10	19/10 y 20/10	20/10 y 21/10	21/10 y 23/10	23/10 y 24/10	24/10 y 25/10	25/10 y 26/10	26/10 y 27/10
		$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$
1	G8-04e	0.048	0.044	0.01	-0.023	-0.003	0.012	0.012	0.002	0.013	0	0.014	-0.113
	G8-05e	0.005	0.043	-0.004	-0.015	-0.004	0.004	0.02	0.003	0.018	-0.004	0.022	-0.112
	G8-06e	0.008	0.041	0.001	-0.015	0.007	0.015	0.011	0.005	0.018	-0.004	0.016	-0.113
2	G8-10e	0.006	0.039	0.007	-0.026	0.001	0.014	0.016	-0.005	0.017	0	0.017	-0.088
	G8-11e	0.007	0.04	0.013	-0.018	0	0.012	0.01	0.002	0.017	0	0.016	-0.085
	G8-12e	0.004	0.047	0.009	-0.015	-0.002	0.014	0.01	0.006	0.018	-0.001	0.008	-0.076
3	G8-16e	0.008	0.037	0.012	-0.015	-0.005	0.017	0.005	-0.001	0.018	0	0.014	-0.093
	G8-17e	0.007	0.042	0.007	-0.012	0.002	0.012	0.009	0.001	0.021	-0.001	0.025	-0.079
	G8-18e	0.002	0.05	0.006	-0.009	0.002	0.011	0.009	0.008	0.01	0	0.017	-0.083
7	G8-40e	0.004	0.062	0.018	-0.013	-0.004	0.01	0.012	0.011	0.009	0	0.014	-0.136
	G8-41e	0.006	0.062	0.025	-0.014	-0.003	0.004	0.012	0.011	0.007	0	0.012	-0.134
	G8-42e	0.007	0.058	0.026	-0.009	0.001	0.004	0.013	0.015	0.009	-0.002	0.011	-0.081
8	G8-46e	0.004	0.063	0.019	-0.015	0.004	0.007	0.01	0.009	0.008	0	0.015	-0.109
	G8-47e	0.004	0.065	0.024	-0.003	-0.003	0.007	0.011	0.01	0.002	0	0.013	-0.125
	G8-48e	0.001	0.068	0.022	0	0.004	-0.001	0.015	0.011	0.01	0	0.011	-0.016
5	G8-28e	0.006	0.065	0.016	-0.013	0.002	0.013	0.011	0.003	0.007	-0.001	0.013	-0.17
	G8-29e	0.004	0.071	0.026	-0.013	0	0.002	0.015	0.007	0.007	0	0.011	-0.156
	G8-30e	0.005	0.066	0.02	-0.003	0.001	0.002	0.01	0.015	0.006	0	0.01	-0.157
6	G8-34e	0.004	-0.05	0.026	-0.028	0.016	0.03	0.014	-0.09	0.028	0.003	0.013	-0.082
	G8-35e	0.006	0.037	0.017	-0.025	0.018	0.002	0.015	-0.002	0.018	0.014	0.001	-0.075
	G8-36e	0.004	0.039	0.019	-0.027	0.017	0.003	0.012	-0.001	0.021	0.014	0	-0.083
4	G8-C1e	0.005	0.025	0.03	-0.033	0.015	0.127	-0.105	-0.008	0.035	-0.002	0.009	-0.085
	G8-C2e	0.004	0.032	0.025	-0.025	0.012	0.006	0.012	-0.006	0.026	0.006	0.006	0.018
	G8-C3e	0.005	0.034	0.023	-0.023	0.012	0.006	0.011	-0.006	0.026	0.007	0.007	0.015

Tabla 5.13. Variación de potencial $\Delta E2$.

Cód. Prov.	Prob.	Variación de Potencial												
		27/10 y 28/10	28/10 y 30/10	30/10 y 31/10	31/10 y 2/11	2/11 y 3/11	3/11 y 4/11	4/11 y 6/11	6/11 y 7/11	7/11 y 8/11	8/11 y 9/11	9/11 y 10/11	10/11 y 11/11	11/11 y 13/11
		$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$	$\Delta E2(V)$
1	G8-04e	0.022	-0.032	-0.004	0.004	-0.016	0.009	-0.018	0	0.022	-0.06	0.01	-0.001	0.037
	G8-05e	0.016	-0.035	-0.006	0	-0.01	0.011	-0.021	0.006	0.031	-0.068	0.005	-0.008	0.038
	G8-06e	0.028	-0.042	0.002	0.002	-0.012	0.013	-0.021	0.006	0.031	-0.067	0.012	-0.008	0.027
2	G8-10e	-0.007	-0.039	-0.003	0.011	-0.007	0.006	-0.017	0	0.028	-0.068	0.012	0.003	0.058
	G8-11e	0.001	-0.035	-0.002	0.004	-0.01	0.008	-0.011	0	0.028	-0.059	0.008	-0.002	0.044
	G8-12e	0.001	-0.031	-0.006	-0.003	-0.007	0.003	-0.012	0.009	0.022	-0.027	0.013	-0.014	0.046
3	G8-16e	-0.002	-0.036	0.098	0.009	-0.005	0.001	-0.009	0	0.019	-0.057	0.007	0.006	0.058
	G8-17e	0.002	-0.033	-0.001	0.007	-0.012	0.008	-0.007	0.002	0.02	-0.057	0.009	-0.001	0.047
	G8-18e	0.007	-0.026	-0.006	0.004	-0.004	0	-0.005	0	0.022	-0.055	0.009	0.002	0.039
7	G8-40e	0.016	-0.03	0.009	0.012	-0.006	0.005	-0.007	0.008	0.02	-0.046	0.01	0.003	0.044
	G8-41e	0.037	-0.028	-0.002	0.014	-0.009	0.001	-0.007	0.007	0.021	-0.042	0.003	-0.005	0.027
	G8-42e	0.025	-0.028	-0.003	0.009	-0.017	0.008	-0.003	0.007	0	-0.02	0.006	-0.005	0.038
8	G8-46e	0.002	0.007	-0.001	0.009	-0.005	0.001	0.005	-0.002	0.019	-0.038	0.016	-0.015	0.054
	G8-47e	0.016	0.004	-0.012	0.016	-0.011	0.002	0.002	0.005	0.015	-0.029	0.004	-0.006	0.032
	G8-48e	0.012	-0.002	0.001	0.011	-0.011	0.006	0	0.005	0.019	-0.029	0	-0.01	0.034
5	G8-28e	-0.028	0.092	-0.01	0.014	-0.011	-0.002	0.015	-0.01	0.019	-0.026	0.006	0.006	0.04
	G8-29e	0.049	0.013	-0.02	0.007	-0.009	0.007	0.004	0.003	0.02	-0.042	0.018	-0.016	0.047
	G8-30e	0.054	0.005	-0.005	0.009	-0.007	-0.002	0.007	0.008	0.015	-0.026	0.001	-0.007	0.032
6	G8-34e	-0.012	0.029	0.003	0.032	-0.029	0.017	-0.006	-0.003	0.028	-0.042	0.018	-0.005	0.036
	G8-35e	-0.031	-0.014	0.001	0.031	-0.024	0.015	-0.001	-0.009	0.027	-0.039	0.017	-0.005	0.033
	G8-36e	-0.033	0.001	0.002	0.03	-0.027	0.017	-0.006	-0.007	0.023	-0.038	0.017	0.008	0.032
4	G8-C1e	-0.013	-0.028	-0.001	0.032	-0.018	0.012	-0.005	-0.011	0.03	-0.041	0.011	0.012	0.037
	G8-C2e	-0.025	-0.013	-0.002	0.036	-0.025	0.013	-0.001	-0.02	0.031	-0.036	0.027	0.005	0.035
	G8-C3e	-0.035	-0.001	0.003	0.035	-0.025	0.014	-0.004	-0.017	0.03	-0.038	0.015	0.007	0.035

D) Resultados de la corriente I1 y del potencial total Et.

Ahora se presentan los datos de la corriente I1 y del potencial total Et del sistema. En la primera columna se muestran los días en los cuales se registraron los datos, en la siguiente columna se registra el valor de la corriente y en la última columna el valor del potencial Et. El valor de la corriente registrada representa el consumo de todo el sistema. En las tres últimas filas de la tabla se hace un cálculo de los valores máximos, mínimos y del promedio total de I1 y de Et.

Tabla 5.14. Datos de la corriente I1 y del potencial total Et para cada día.

<i>Día</i>	<i>I1 (mA)</i>	<i>Et (V)</i>
13/10	144.9	-1.659
14/10	139.5	-1.635
16/10	132.5	-1.594
17/10	120.8	-1.521
18/10	131.2	-1.556
19/10	131.2	-1.544
20/10	127.5	-1.527
21/10	117.7	-1.515
23/10	126.5	-1.529
24/10	112.1	-1.496
25/10	114.0	-1.499
26/10	108.1	-1.481
27/10	157.9	-1.666
28/10	199.0	-1.68
30/10	220.1	-1.692
31/10	214.2	-1.682
2/11	214.8	-1.662
3/11	223.7	-1.682
4/11	221.8	-1.681
6/11	226.7	-1.692
7/11	226.3	-1.685
8/11	220.5	-1.658
9/11	272.7	-1.764
10/11	259.9	-1.741
11/11	270.8	-1.754
13/11	226.7	-1.722
Máximo	272.7	-1.764
Mínimo	108.1	-1.481
Promedio	189.535	-1.627

E) Cálculo de la densidad de corriente del sistema.

Después de mostrar la tabla 5.14, haremos un cálculo para hallar la densidad de corriente del sistema. Si tenemos la corriente I1, que es la corriente total sistema, calcularemos el área total que se sometió a prueba. Esta área corresponderá a la suma de todas las áreas sumergidas de cada una de las 24 probetas. Entonces tenemos que:

- Las probetas G8-04e, G8-05e, G8-06e, G8-10e, G8-11e, G8-12e, G8-16e, G8-17e, G8-18e, G8-40e, G8-41e, G8-42e, G8-46e, G8-47e, G8-48e suman una área de 720000mm².
- Las probetas G8-28e, G8-29e, G8-30e suman un área de 138000mm².
- Las probetas G8-C1e, G8-C2e, G8-C3e suman un área de 116867,52mm².

La suma total de estas áreas es 974867,52mm². La tabla que sigue a continuación tiene tres columnas, en la primera muestra el día en el que se tomó un registro de la corriente I_l, en la segunda el cálculo de la densidad en mA/mm² y en la tercera y última columna se muestra la densidad en mA/m². Al igual que la tabla 5.9, en las tres últimas filas de la siguiente tabla se hace un cálculo de los valores máximos, mínimos y del promedio total de la densidad de corriente.

Tabla 5.15. Densidad de corriente total del sistema por día.

<i>Día</i>	<i>Densidad (δ) (mA/mm²)</i>	<i>Densidad (δ) (mA/m²)</i>
13/10	0.00014864	0.148
14/10	0.0001431	0.143
16/10	0.00013592	0.135
17/10	0.00012391	0.123
18/10	0.00013458	0.134
19/10	0.00013458	0.134
20/10	0.00013079	0.130
21/10	0.00012073	0.120
23/10	0.00012976	0.129
24/10	0.00011499	0.114
25/10	0.00011694	0.116
26/10	0.00011089	0.110
27/10	0.00016197	0.161
28/10	0.00020413	0.204
30/10	0.00022577	0.225
31/10	0.00021972	0.219
2/11	0.00022034	0.220
3/11	0.00022947	0.229
4/11	0.00022752	0.227
6/11	0.00023254	0.232
7/11	0.00023213	0.232
8/11	0.00022618	0.226
9/11	0.00027973	0.279
10/11	0.0002666	0.266
11/11	0.00027778	0.277
13/11	0.00023254	0.232
Máximo	0.00027973	0.279
Mínimo	0.00011089	0.110
Promedio	0.00018389	0.183

5.1.2 Gráficas experimentales.

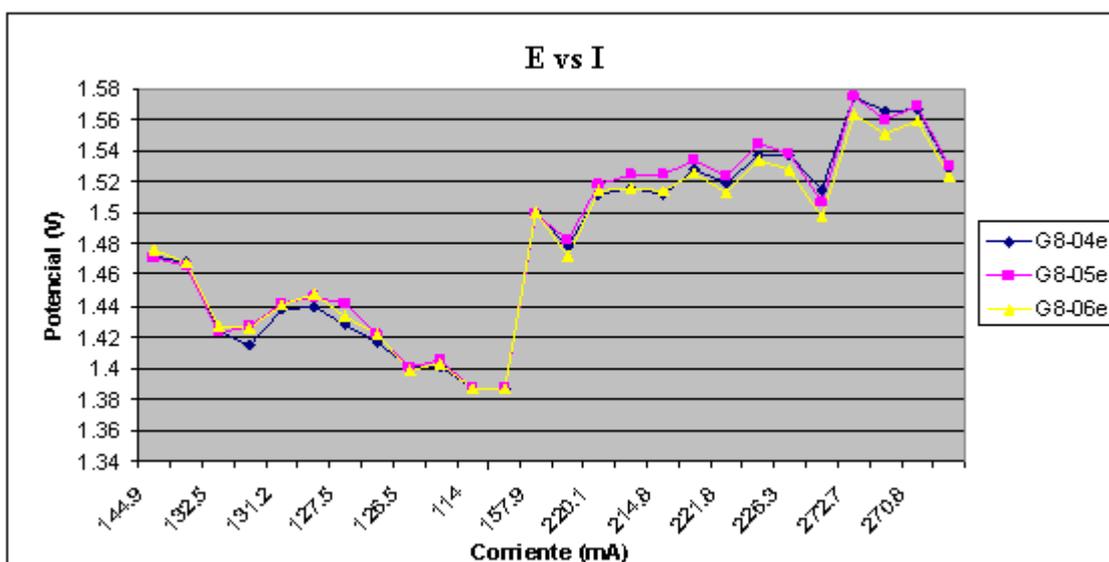
En este apartado, se han elaborado distintas gráficas que se han considerado importantes para complementar la información obtenida en el ensayo, y dar una perspectiva más ilustrativa a los datos registrados; así como de algunos cálculos efectuados posteriormente. Todas las gráficas se han elaborado en base a los datos registrados durante los 32 días de duración del ensayo. Se hace una breve descripción de los gráficos, y posteriormente en el apartado 5.2 se hará una discusión y comentario con mayor amplitud.

5.1.2.1 Gráficas de potencial E2 vs corriente I1.

A continuación mostramos los ocho primeras figuras de éste apartado. En este caso se grafica el potencial E2 que está en voltios (eje Y) vs la corriente I1 (eje X) que está en miliamperios. Se ha elaborado una gráfica para cada sistema ó proveedor evaluado, es decir, se muestran tres curvas (trazadas cada una con un color diferente una para cada probeta). En las gráficas también se incluye el potencial E1. En cada uno de las ocho figuras, se hace uso de los mismos tres colores y cada color se asignará a una probeta diferente; conservando el mismo orden para en todos los gráficos de este apartado. Los datos del potencial E2 se han tomado de las tablas 5.7 y 5.8 y los datos de la corriente I1 se han tomado de la tabla 5.14. Debemos aclarar que se han graficado los valores absolutos de los datos de E1, E2 y Et.

En las siguientes figuras podemos observar que casi a la mitad se ilustra una recta que parte en dos a cada gráfica. En la parte de la izquierda vemos como cae el potencial E2 en algunas gráficas más que en otras, dependiendo del requerimiento de corriente I1 que las probetas necesitaron en un determinado punto. En la parte de la derecha observaremos que las graficas se mantuvieron en distintos rangos de potencial E2 (eje Y), algunos como en la figura 5.1 tendieron a aumentar a medida que avanzaba del período de prueba.

Figura 5.1. Recubrimiento del proveedor - código 1.

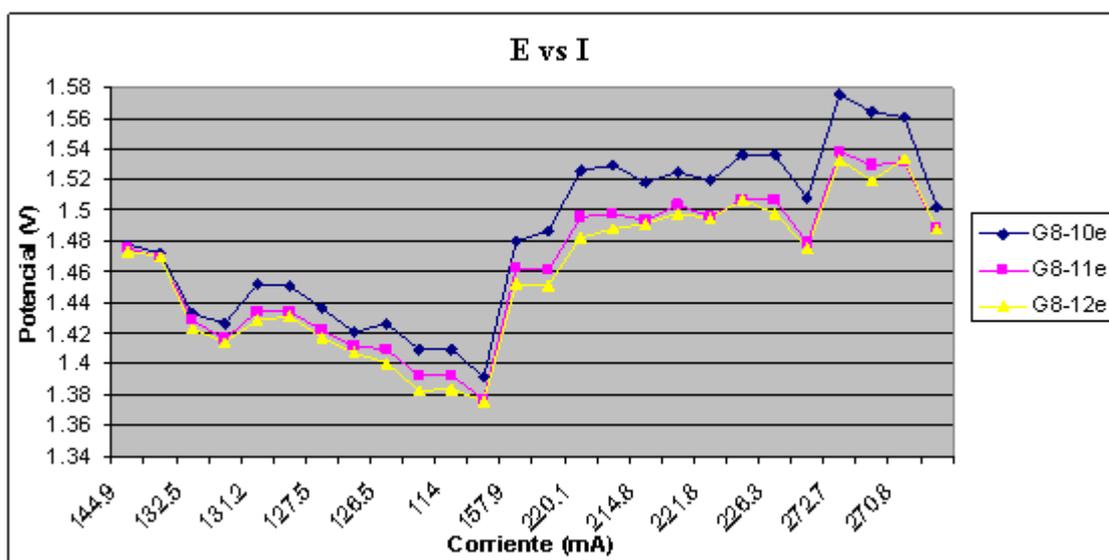


En esta figura así como en las siete siguientes se puede apreciar como varía el potencial E2 en relación con la corriente I1.

En la figura 5.1 se observa que hacia la izquierda cae el potencial E2 y hacia la derecha se mantiene en un rango más alto aunque el potencial va aumentando poco a poco, y tiende a subir. Aquí se observa que la curva es inestable, poco constante, además se puede observar que la mayoría de las coordenadas están por encima de 1.5 (-1.5 V).

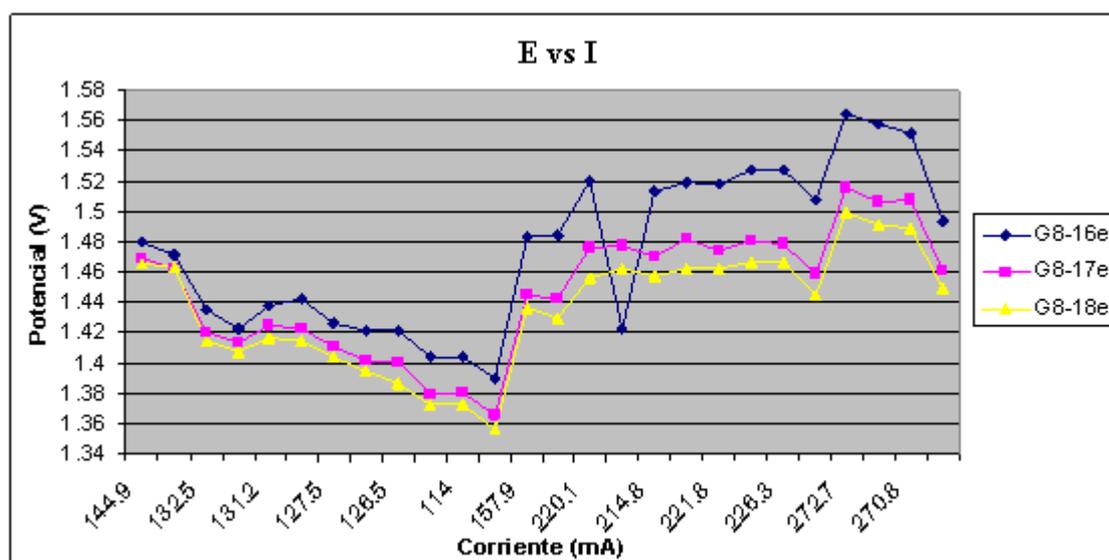
En el apartado 5.2, se explica el motivo de la reducción de la corriente y qué causó el salto brusco de potencial.

Figura 5.2. Recubrimiento del proveedor - código 2.



En esta figura (5.2) vemos que las coordenadas han bajado un poco y se encuentran por encima de 1.48 (-1.48 V), es decir que el potencial fue menor para estas probetas en comparación a las anteriores. También podemos ver cierta inestabilidad en estas gráficas. Igual que en el figura anterior, se observa cómo estas curvas van escalando por el eje Y.

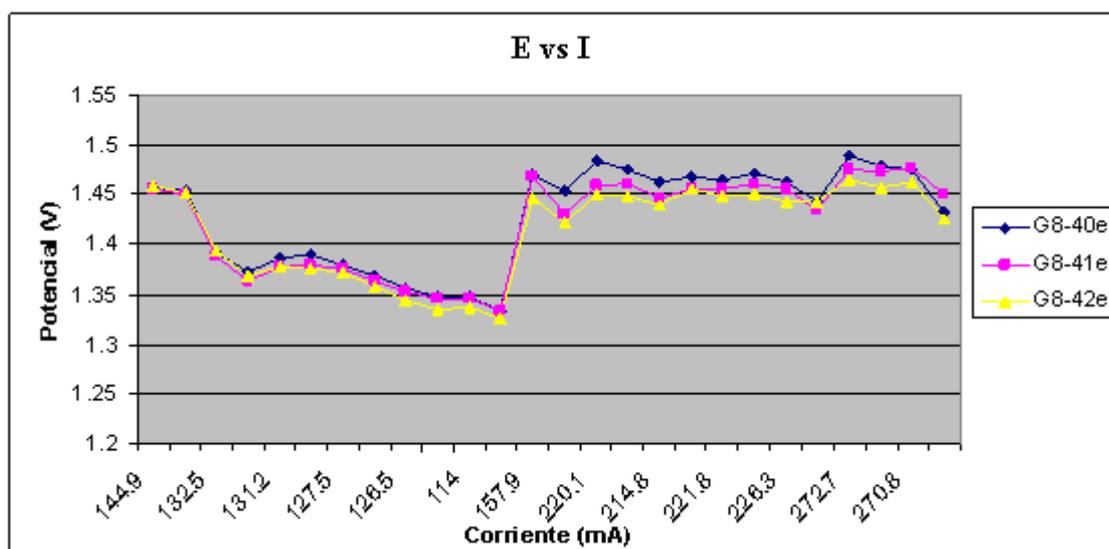
Figura 5.3. Recubrimiento del proveedor - código 3.



En la figura 5.3 podemos ver una marcada inestabilidad en el lado derecho de la recta que está a la mitad de la curva. El potencial se encuentra casi por encima de 1.46 (-1.46 V). En comparación con las dos figuras anteriores, aquí se puede observar que en estas probetas se registraron potenciales marcadamente más diferenciados en esta sección. También hay una tendencia al incremento en el nivel de potencial, aunque más discretamente.

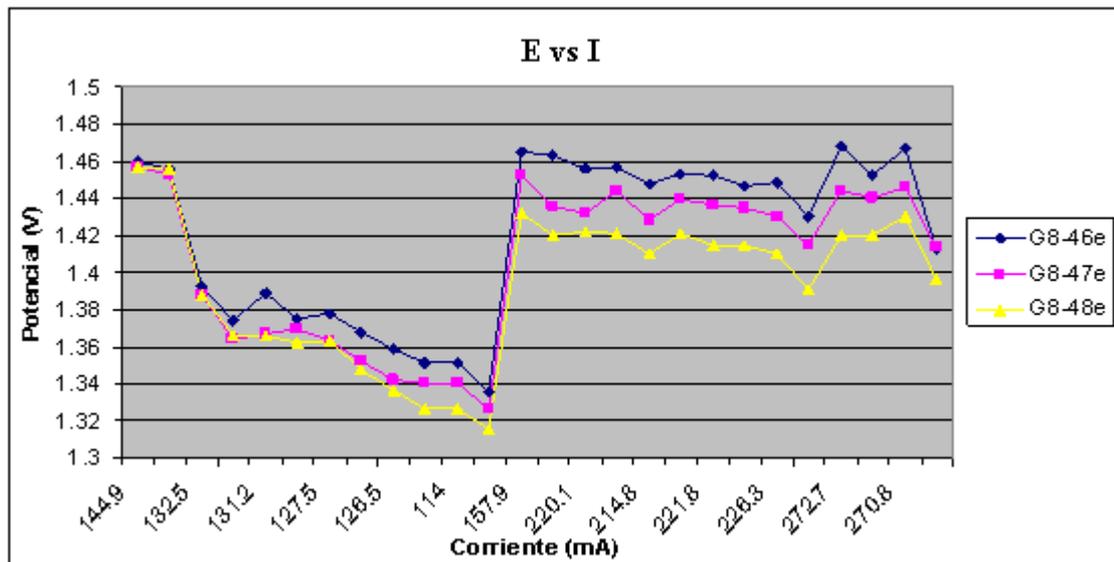
Las figuras 5.1, 5.2 y 5.3, corresponden a las probetas inmersas en la bandeja A; donde se presentaron los mayores valores de potencial E2 y donde hubo mayor indicio de desprendimiento catódico.

Figura 5.4. Recubrimiento del proveedor - código 7.



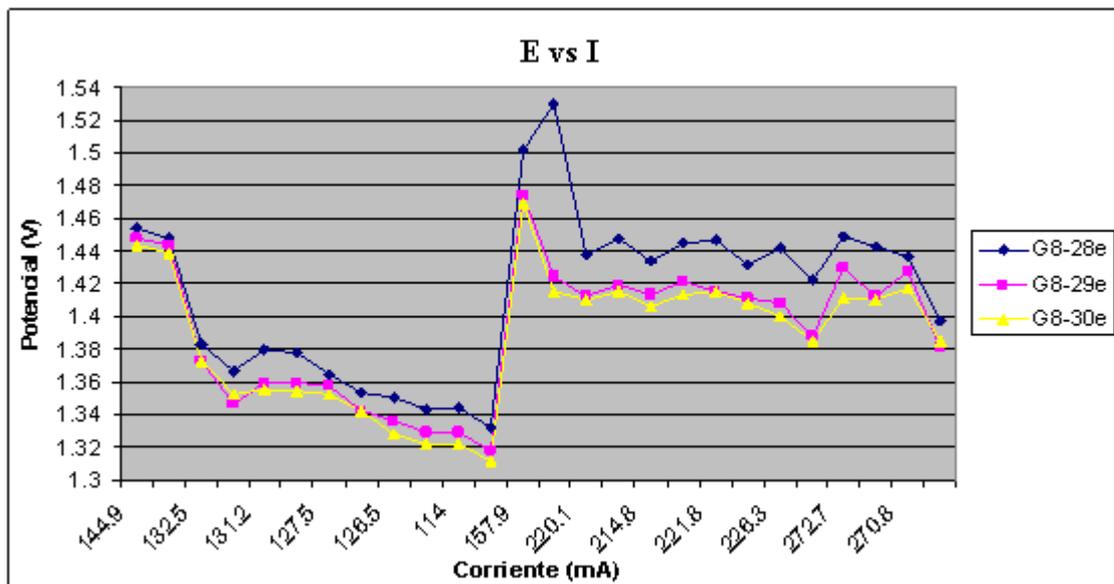
En la figura (5.4), vemos que las coordenadas de las curvas se encuentran por debajo de 1.5 (-1.5 V) y además hay mayor estabilidad en el potencial, en comparación a lo observado en los gráficos anteriores. Estas probetas mantuvieron una constancia en cuanto al requerimiento de potencial E2, y por lo que se observa, no hubo tendencia de aumento de potencial. Sin embargo, como se puede observar en el anexo C, el recubrimiento resultó dañado al finalizar el ensayo.

Figura 5.5. Recubrimiento del proveedor - código 8.



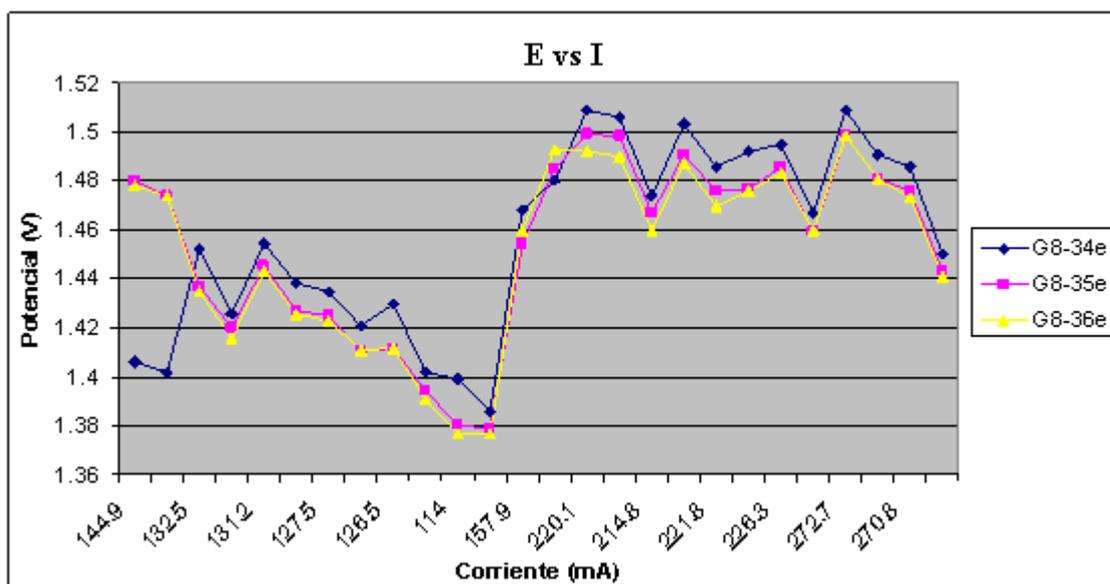
En la figura (5.5) se observa un parecido entre las curvas para cada una de las probetas, y es esto demuestra la estabilidad de las gráficas, cada una con sus respectivas coordenadas. Cada una de las probetas tuvo un requerimiento de potencial muy distinto el uno del otro. También se observa que no hubo tendencia de aumento de potencial.

Figura 5.6. Recubrimiento del proveedor - código 5.



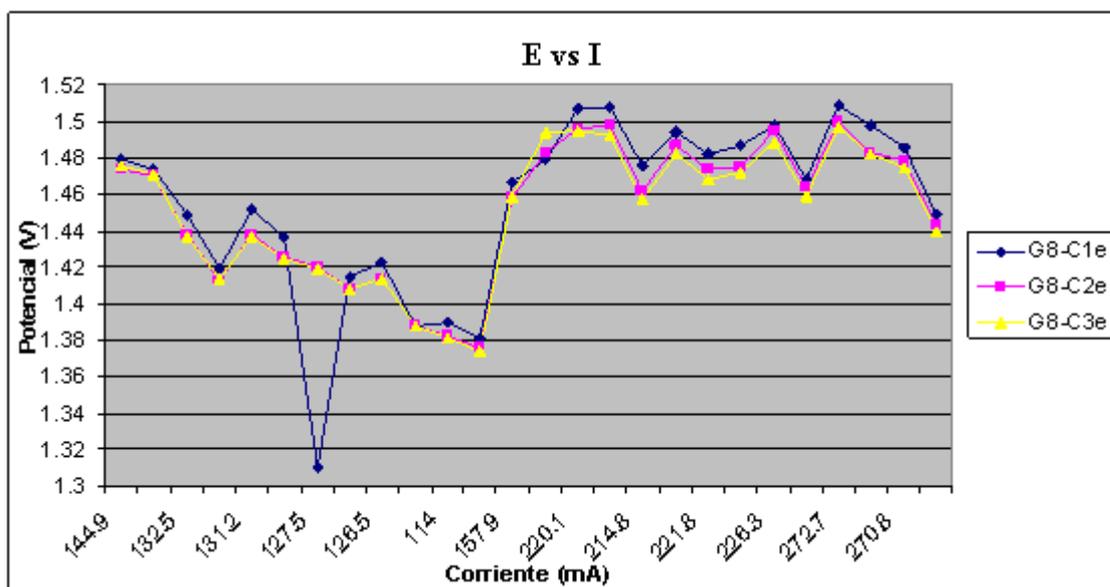
En la figura 5.6 vemos primeramente que por la parte izquierda de la recta media, se llegó a tener el nivel más bajo de potencial, pero además en la parte derecha se observa que inicialmente vuelve a disminuir su potencial, tratando luego de alcanzar un equilibrio y mantener una relativa estabilidad; mostrando luego una tendencia muy discreta a ir decreciendo el nivel en el eje Y, a medida que va transcurriendo el ensayo.

Figura 5.7. Recubrimiento del proveedor - código 6.



La figura (5.7) muestra el comportamiento más inestable del apartado. Observando el gráfico, se puede analizar que los requerimientos de potencial E2 para esas probetas fueron muy variables.

Figura 5.8. Recubrimiento del proveedor - código 4.

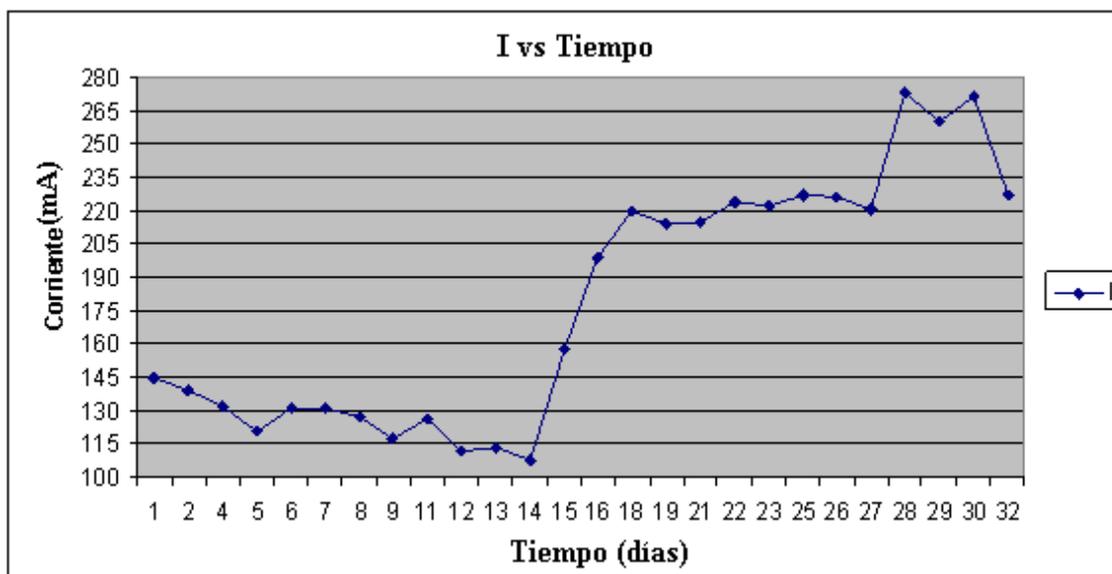


La figura 5.8, a excepción de un pico hacia abajo de la curva en color azul en la parte izquierda muy discutible, muestra uno de los gráficos más estables y constantes de todos los anteriores, no sólo en la parte de la derecha, sino también, por la parte de la izquierda lo cual no se ha observado en los gráficos anteriores. Estos especímenes fueron de los que mostraron los mejores resultados al culminar el período de prueba.

5.1.2.2 Gráfica corriente I vs tiempo.

Ahora se presenta un gráfico del comportamiento de la corriente (eje Y) respecto al tiempo (días) de ejecución del ensayo (eje X). Esta gráfica se realizó con el fin de visualizar la variación de la corriente del sistema a medida que transcurrían los días, teniendo en cuenta que el potencial E_2 , variaba algunas veces de manera considerable de un día a otro, aumentando o disminuyendo. En el eje X se muestran con precisión el número de los días en los cuales se hizo el registro de datos.

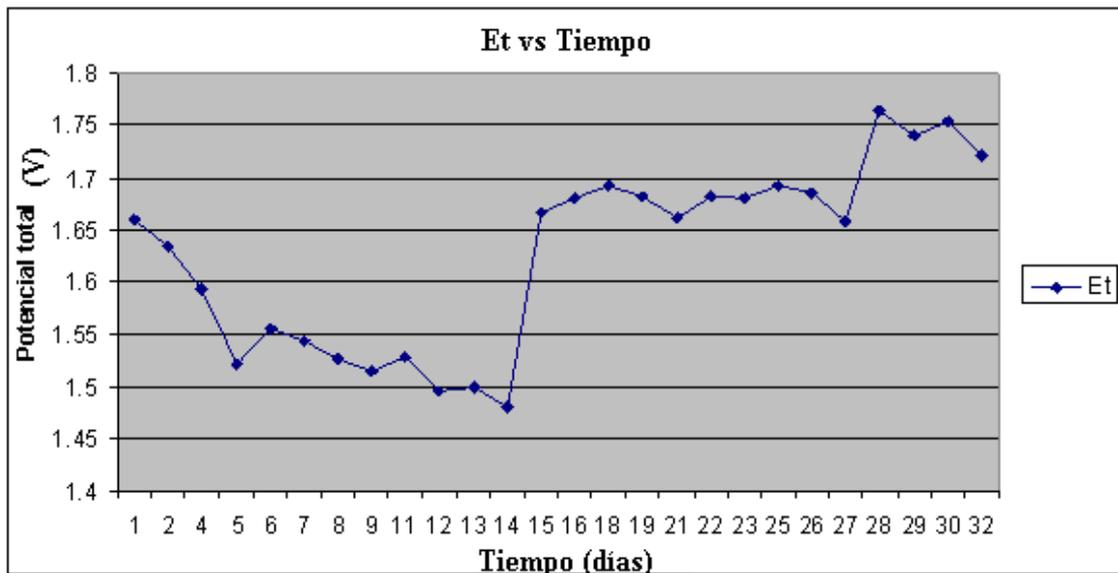
Figura 5.9.



5.1.2.3 Gráfica de potencial total E_t vs tiempo.

Ahora mostraremos el gráfico con la curva potencial total E_t (eje Y) vs tiempo (días) en el eje X. Este gráfico es una variación del anterior, la diferencia es que en éste se ha tomado como variable al potencial E_t . Igualmente, este nos permite observar cómo varía el potencial total E_t en el transcurso del ensayo. Los datos del potencial E_t se han tomado de la tabla 5.14.

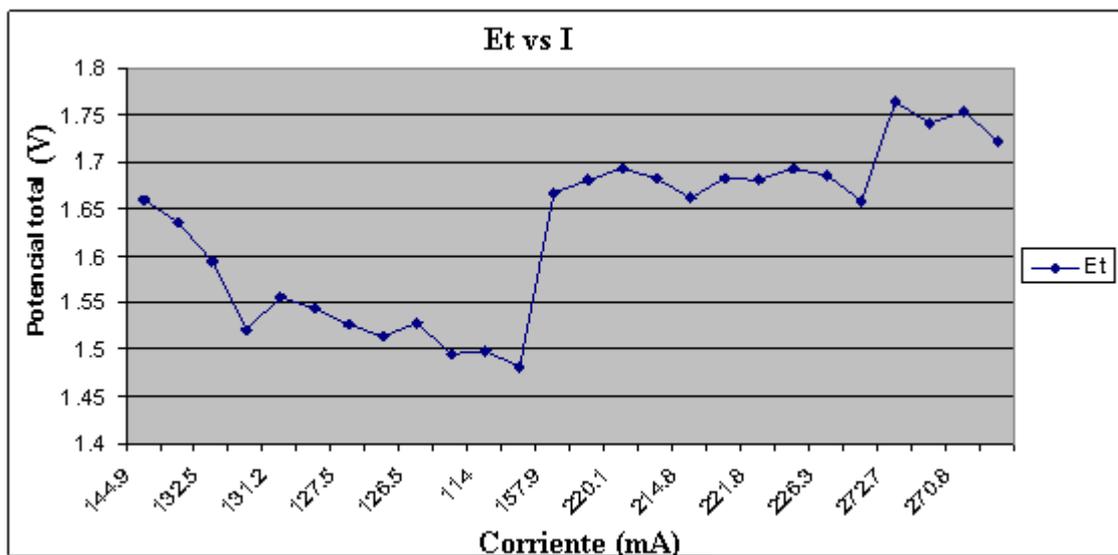
Figura 5.10.



5.1.2.4 Gráfica del potencial total Et vs corriente I1.

En el siguiente gráfico se muestra la curva de corriente I1 (eje X) vs potencial total Et (eje Y). Aquí observaremos cómo el potencial Et varía con respecto a la corriente I1, con lo cual podremos hacer una comparación con respecto a los gráficos del apartado 5.1.2.1 donde se aprecia la variación de E2 respecto a I1. Se puede hacer un mejor diagnóstico, sabiendo como varía la curva del potencial total del sistema Et y como varía la curva del potencial E2 que es el potencial por probeta.

Figura 5.11.



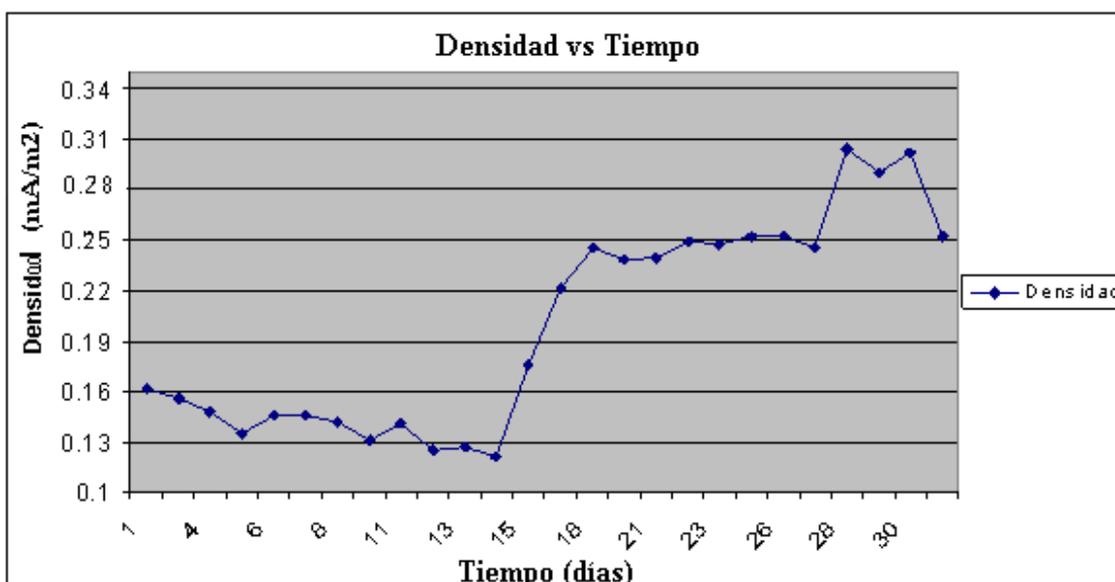
Podemos observar que este gráfico es idéntico al de la figura 5.10 (apartado 5.1.2.3), esto es debido a que en el caso anterior el eje X era representado por los días en los que se realizó el ensayo, mientras que en este apartado, es representado por la corriente I1, entonces las coordenadas (x,y) en cuanto a la ubicación no son distintas, pero en cuanto a

su valor si lo son. Es importante tener en cuenta este gráfico que, como se mencionó antes, servirá para realizar las comparaciones pertinentes.

5.1.2.5 Gráfica de densidad de corriente vs tiempo.

La figura 5.12 muestra la curva de densidad de corriente (eje Y) respecto al tiempo de ejecución del ensayo en días (eje X). Los datos de la densidad de corriente se han tomado de la tercera columna de la tabla 5.15, expresados en mA/m². La gráfica tiene gran similitud con aquella de la figura 5.9, pues en esa gráfica el eje Y esta representado por la corriente I_1 , que es una variable de la densidad.

Figura 5.12.



5.1.2.6 Gráfica de variación de potencial ΔE_2 vs. Días.

En el anexo E ilustramos ocho gráficos (tipo columna), en las cuales se muestra la variación de ΔE_2 . En el eje X se encuentran los valores que representa la resta entre dos días hábiles consecutivos en los que se realizó el ensayo, al cual hemos denominado diferencia, y en el eje Y, se encuentran los valores numéricos ΔE_2 . Por ejemplo, el valor 1 simboliza la diferencia 1, entre el día 13/10 y el día 14/10; en ordenadas se registra el valor ($E_2 - E_1$), el valor 2 simboliza la diferencia 2 entre el día 16/10 y el día 17/10 y en ordenadas la diferencia ΔE_2 y sucesivamente hasta el final, con lo cual obtendremos 25 valores en el eje X.

En estos gráficos se han registrado los valores ΔE_2 negativos. Estos valores se encuentran en las tablas 5.12 y 5.13. Cada uno de estos gráficos corresponde a un sistema de un proveedor distinto. En los gráficos podemos observar que para cada diferencia hay tres columnas, a cada una se le ha asignado una probeta distinta, de las tres que le corresponden a cada proveedor. Las barras que están hacia abajo son lógicamente ocasionadas por ΔE_2 negativos; es decir, como se mencionó en el apartado 5.1.1.3 sección C), en este caso el potencial E_2 aumentó de un día a otro. Estos gráficos se pueden entender mejor observando las tablas 5.7 y 5.8, donde se encuentran los valores de E_1 y E_2 y con las figura 5.1 a la figura 5.8.

En el gráfico G.1 (ver anexo G), que muestran la variación de potencial de las probetas G8-04e, G8-05e y G8-06e respectivamente, se puede apreciar como el tamaño de las barras varía mucho, esto indica que de un día a otro el potencial de estas probetas aumenta ó disminuye, debido al desprendimiento catódico del recubrimiento en sus superficies, por ello los especímenes trataban de tomar un potencial E2 de protección. Estas probetas resultaron muy dañadas al término del ensayo.

5.2 Discusión de resultados.

Después de haber realizado un informe final con los resultados obtenidos durante el período de ensayo, mostrando tablas y gráficas ilustrativas; ahora se intentará dar una explicación y evaluación del significado de estos resultados y de los cálculos que se han realizado. Hay que tener en cuenta que algunas tablas se relacionan con algunas gráficas, pues éstas son el resultado de los datos registrados durante la prueba.

Durante los doce primeros días se realizó un monitoreo del ensayo sin aplicar correcciones en el potencial con el rectificador. Se trató de determinar, el valor de potencial E2, de equilibrio, para cada probeta; se sabe que el potencial E2 de cada espécimen tiende a subir hasta que ocurre el fenómeno de polarización, llegando a un punto donde tendría que mantenerse estable. Lo primero que se observó fue que las probetas de la bandeja C específicamente para las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e, disminuyeron su potencial en el tercer día de forma drástica (de -1.45 a -1.39 V), al contrario de las otras que mantuvieron su potencial sobre -1.4 V. Esto básicamente se debió a que las probetas antes mencionadas no tenían recubrimiento en la parte posterior, solo recibieron una capa de resina para aislarlas de la corrosión (que se aplicó de la mejor manera posible); sin embargo, está capa no resistió el potencial inicial que se le aplicó a las probetas y aceleradamente comenzaron a mostrar el desprendimiento catódico, con lo cual la tensión (E2) bajó drásticamente al transcurrir los días. Esto generó que todas las probetas del sistema empezaran a descender en su potencial E2 y por consiguiente la corriente I1 y el potencial Et. Esto se aprecia en la parte izquierda de las gráficas de la figura 5.6.

Al mostrar desprendimiento catódico, el área de la superficie metálica aumenta. Cuando se tiene mayor área expuesta, se requiere de más corriente de lo contrario el potencial disminuye. Una de las probetas más afectadas con esto fue la G8-29e, en la cual se registró uno de los potenciales más bajos de todo el sistema (-1.318 V). Con estos potenciales tan bajos no debería presentarse daños debido al desprendimiento catódico. Sin embargo, esto se debe, a la mala preparación superficial que se le aplicó a esta probeta en particular. Las probetas del proveedor con código 7 y 8 de esta misma bandeja, mostraron también una disminución en el potencial; sin embargo, las probetas del proveedor con código 8, son aquellas que mejor respondieron durante el ensayo, pues no se registró desprendimiento catódico al finalizar la prueba. Entonces puedo deducir que estas probetas al estar en la misma bandeja que aquellas del proveedor con código 5, encontraron un equilibrio con el potencial de estos especímenes y, lógicamente, las probetas del proveedor con código 8, al tener mejor preparación y al estar recubiertas ambas caras de la probeta, resistieron sin ningún problema el potencial que mostró la bandeja B durante todo el ensayo.

En la tabla 5.9 se puede ver que la probeta G8-47e tiene el mínimo valor de los máximos potenciales E2 registrados en el sistema, la probeta G8-30e tiene el mínimo valor de los

mínimos potenciales registrados en el sistema y la probeta G8-29e tiene el promedio de E2 más bajo del sistema. Todas las mencionadas pertenecen a la bandeja B. Por ejemplo, las probetas G8-34e y G8-36e al finalizar el ensayo, mostraron las fallas más significativas del sistema, en donde la capa de “*poly film*” se ampolló de forma notable, no sólo en la superficie sumergida; como se mencionó en párrafos anteriores. El día 26/10, según se describe en el capítulo IV, se observó la primera falla en la probeta G8-36e, con lo cual el potencial E2 en esta bandeja desciende. Al ajustar el potencial posteriormente, se nivelan con el potencial E2 de las probetas del proveedor con código 4, que están en la misma bandeja; debido a que éstas últimas también fueron de las que resistieron muy bien durante el ensayo, logrando alcanzar durante el período de prueba un potencial E2 cercano a -1,5 voltios.

Las probetas G8-34e y G8-36e tenían mejor preparación de superficie que las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e, por lo que se pudo observar que a excepción de la última capa (acabado), las capas anteriores (base y enlace) no mostraron daño alguno, esto permitió de alguna manera mantener un potencial más alto.

Al décimo tercer día del ensayo (27/10) el potencial E2 se corrigió, debido a que se encontraba muy por debajo del rango de potencial que indica la norma ASTM G8. Este día el potencial E2 se recalibraría por primera vez, y se ubicó en un rango que estaba entre -1.43 y -1.5 voltios, y desde ese día se hizo un monitoreo eléctrico y ajuste, para evitar que el potencial disminuyese o aumente saliéndose del rango establecido, como sucedió inicialmente. En las gráficas del apartado 5.1.2.1 (figuras 5.1 a la 5.8), podemos observar en todas que casi a la mitad de las tres curvas en cada gráfico, se visualiza una línea casi recta, ligeramente inclinada hacia la derecha, esto representa el drástico ajuste de potencial que se hizo el día 27/10. Algunas gráficas muestran en la parte derecha de esta recta una estabilidad, otras en cambio muestran inestabilidad, algunas muestran tendencia a aumentar el potencial y otras a disminuir. Si la gráfica es estable, significa que el recubrimiento tiene mejor calidad o que la preparación superficial ha sido aceptable siguiendo las normas, o ambas. Por ejemplo, el proveedor con código 1 presenta una gráfica cuya curva muestra una relativa estabilidad, esto demuestra que es un recubrimiento de buena calidad, pero observando los resultados durante y al finalizar el ensayo, se deduce entonces que tuvo una inadecuada preparación superficial. Por el contrario, el proveedor con código 4 presenta una gráfica muy estable, y observando también los resultados durante y al finalizar el ensayo, deducimos que es un recubrimiento de buena calidad y que además tuvo una buena preparación superficial.

El sistema fue encontrando un equilibrio en el potencial para cada bandeja, por ejemplo la bandeja A se mantuvo en un rango de -1.46 a -1.56 voltios, la bandeja B se mantuvo en un rango de -1.4 a -1.46 voltios, por último la bandeja C se mantuvo en el rango de -1.46 a -1.5 voltios. Esto se puede apreciar mejor en las figuras 5.1 a la 5.8. Este equilibrio se da teniendo en cuenta el potencial E2 que cada probeta requirió desde el inicio del ensayo. Por ejemplo, los especímenes de la bandeja A desde un principio tuvieron los potenciales E2 más altos del sistema y así lo mantuvieron durante todo el período de prueba. Igual sucedió con las demás bandejas. Debido a que las tres bandejas formaban un sistema, por estar conectadas entre sí, se hacía muy difícil controlar el potencial E2 de cada una de las probetas, porque mientras se calibraba el potencial E2 de los especímenes de la bandeja A para que mantengan el rango de la norma ASTM G8, los especímenes de las otras dos bandejas se descalibraban. Debido a esto, se trató de encontrar un rango

adecuado para el potencial E2, ubicado dentro de lo establecido por la norma, y que a la vez no perjudique a las probetas durante el ensayo.

Si se observa en la tabla 5.12, la corriente **I1** a partir del viernes 27/10 empezó a incrementarse juntamente con el potencial total E_t del sistema. Esto se debió como ya se dijo en el párrafo anterior, a que el potencial se aumentó a partir de ese día debido a que había caído por debajo de -1.4 voltios. Luego se mantendría entre los 220 y 226 mA, pues el sistema había encontrado un equilibrio en ésta parte del ensayo, a excepción del día 9/11 donde se registraron los valores más altos de potencial E2, ver tabla 5.9, y esto se debe a que dos días antes éste evento, se había aumentado porque estaba experimentando una baja. El día 10/11, el potencial E2 disminuyó en comparación al día anterior, pero el día 11/11 más de la mitad de las probetas del sistema aumentaron nuevamente su potencial (ver tabla 5.13), y a partir de esta fecha hasta el día 13/11 empezó a disminuir. Las probetas van encontrando durante el transcurso del ensayo, un potencial de protección; y a la vez se equilibran con las demás probetas que se encuentran en la misma bandeja, formando entre ellas un pequeño sistema dentro del sistema total, protegiéndose contra la corrosión y evitando el desprendimiento catódico.

Analizando desde otro punto de vista a la prueba realizada, tenemos que la densidad de corriente en el sistema, calculado con los datos registrados de la corriente I1, dio un máximo de 0.279 mA/m^2 y un mínimo de 0.110 mA/m^2 (ver tabla 5.15). Teniendo en cuenta que son veinticuatro probetas, calculamos entonces aproximadamente para cada una el máximo valor es 0.011 mA/m^2 y el mínimo valor de aproximadamente 0.005 mA/m^2 (considerando que no todas las probetas tuvieron la misma área sumergida), por lo tanto podemos decir que el sistema mantuvo una densidad de corriente, que estaba dentro de lo esperado para cada uno de los especímenes, según se indica en la teoría.

Menos de la tercera parte del tiempo (32 días) se tuvo que añadir agua al sistema, (la norma ASTM G8 menciona que hay que mantener el nivel inicial de agua en el sistema hasta el término del ensayo), los días en que se añadió el agua de reposición, fue en los mismos días para las tres bandejas. Lo que si se pudo observar, es que la bandeja A consumió ligeramente más agua por evaporación que en las otras dos bandejas, esto se deduce al verificar que este recipiente en particular, mantuvo un alto nivel de potencial E2 por probeta, en casi todo el período de prueba. El alto potencial que se mantenía generaba un ligero calentamiento y, por lo tanto, mayor evaporación.

Conclusiones

1. Dentro del rango del potencial E2 que se mantuvo durante el período de la prueba; tomando en cuenta los resultados observados en el examen físico que se muestran en el anexo C, y los requerimientos de corriente de protección ilustrados en el anexo E; se ha podido concluir que, los mejores sistemas de recubrimientos al finalizar el período del ensayo se observaron en las probetas G8-34e, G8-35e, G8-36e, G8-46e, G8-47e, G8-48e, G8-C1e, G8-C2e y G8-C3e, haciendo un reconocimiento importante a las tres últimas probetas, pues tuvieron resistencia a un potencial más elevado que las tres primeras. Por lo tanto, consideramos que un potencial E2 más bajo al registrado en esta prueba, puede ser soportado con éxito por los recubrimientos mencionados, en un sistema de protección mixto con protección catódica. Un dato adicional que reafirma la calidad de la preparación superficial del proveedor con código 8, son los resultados obtenidos en una prueba de adherencia realizada en el laboratorio de metalotecnia, en otras probetas con igual preparación superficial y con el mismo sistema de recubrimiento suministrado por el mismo proveedor, en las cuales se observó que existe una gran adherencia a la superficie metálica.
2. Las probetas de la bandeja A fueron las que presentaron mayor evidencia de desprendimiento catódico, esto no sólo se originó por el alto potencial E2 que registraron estos especímenes, sino que también se debió a la mala preparación de la superficie metálica antes de aplicar los recubrimientos. Como se mencionó en el capítulo II, la preparación superficial es parte fundamental antes de aplicar el recubrimiento, la cual debe cumplir con un criterio de aceptación. Por tanto, los especímenes de la bandeja A **no resistieron** los potenciales E2 que se registraron en el ensayo. En esta bandeja se evaluaron las probetas del proveedor con código 1, que presentaron el segundo valor más alto de requerimiento de corriente de protección. Ya sea por una inadecuada preparación superficial o por la calidad del recubrimiento, el sistema con el código 1 presentó los peores resultados al finalizar el ensayo.
3. Las probetas G8-34e y G8-36e tuvieron fallas sólo en la capa de acabado (*poly film*); esto indica que mientras mejor sea aplicada esta capa, es decir, siguiendo las indicaciones técnicas del caso, se obtendrá mejores resultados. Las capas de base y enlace no sufrieron mayores inconvenientes. Esto se puede observar en la probeta G8-35e, la cual no sufrió deterioro; ya que teniendo los mismos registros de potencial E2 que las otras del mismo tipo, cuenta evidentemente con una mejor aplicación de la última capa.
4. La probeta G8-29e, tuvo indicio de desprendimiento catódico con los potenciales E2 registrados, los cuales fueron los más bajos del ensayo. Sin embargo, las probetas G8-28e y G8-30e no presentaron indicio de desprendimiento catódico a similares potenciales E2. Esto quiere decir que a potenciales más altos, se hubiese notado con más evidencia el desprendimiento catódico con la formación de ampollas en la probeta G8-29e, incluso sin llegar a la sobreprotección. Por tanto concluyo que en el caso específico de esta probeta, hubo una mala preparación superficial (no resistió siquiera potenciales mayores a -1.4 V), pues como mencionamos anteriormente, las otras dos probetas del mismo proveedor si resistieron los potenciales registrados. Se observó en estos

especímenes, que tienen un elevado requerimiento de corriente de protección, lo cual significa un mayor gasto en comparación a los otros recubrimientos sometidos a este ensayo. También podemos concluir que no es uno de los mejores recubrimientos, por el elevado costo que significaría para una empresa.

5. Las probetas G8-40e, G8-41e y G8-42e aparentemente resultaron sin fallas, pero al momento de desprender la pintura con un cuchillo afilado, mostraron que habían tenido daño por desprendimiento catódico. Debido a que las fallas no fueron las más evidentes cuando se realizó el examen físico, concluyo según los datos de potencial E2 registrados, que a un potencial que se encuentre por debajo de -1.42 V, el recubrimiento resistirá el desprendimiento catódico y protegerá a la tubería contra la corrosión.
6. Se observa que las probetas del proveedor con código 1 tuvieron una preparación mecánica superficial con perfil de anclaje, según lo que se observa en la tabla 4.1 del capítulo IV, sin embargo fueron las más dañadas al finalizar el ensayo. Esto mismo sucedió con la probeta G8-29e y con las probetas del proveedor con código 7. Según la bibliografía consultada sabemos, que las pinturas epóxicas, como son las de los proveedores con código 1, 2, 3, 7 y 8, resisten potenciales de hasta -2.0 voltios, y según los registros del ensayo se llegó como máximo a -1.56 voltios. Esto indica que para el nivel de potencial de ensayo, el rápido deterioro del recubrimiento se debe a que la preparación superficial no se hizo dentro de las normas establecidas, menos aún con la supervisión indicada. En esta tesis no se pone en duda la calidad de los recubrimientos de los proveedores con código 1, 2, 3 y 7, pero si se ha llegado a una conclusión muy importante, acerca de la calidad de la preparación superficial antes de la aplicación. Por tanto se concluye que, si no se le da a la superficie metálica un adecuado nivel de rugosidad al momento de hacer la preparación superficial, debido a un escaso perfil de anclaje, el desprendimiento del recubrimiento se verá favorecido por efecto catódico de la protección eléctrica. Esto significará un gasto prematuro para la empresa, pues antes de lo esperado, las tuberías empezaran a fallar; y se tendrá que realizar un gasto considerable en la reparación de sus instalaciones.
7. Se notó también que los diferentes requerimientos de potencial E2 para cada grupo de probetas en cada bandeja, hacía difícil mantener un rango pequeño de este potencial para el sistema, lo que implicaba un complicado monitoreo eléctrico. Por ejemplo, si a las probetas G8-28e, G8-29e y G8-30e se les otorgaba un E2 cercano a -1.5 V; las probetas G8-04e, G8-05e y G8-06e (que registraron mayor E2) definitivamente pasarían el valor de -1.6 V, con lo que en teoría estarían sobrepasando el potencial máximo permisible estructura/electrolito. Entonces se concluye, que en un ensayo donde se tienen varios tipos de pinturas y además varios recipientes, es muy difícil controlar el potencial, debido a que los requerimientos de corriente son muy distintos uno del otro; dato que puede ser de útil aplicación en la industria. No obstante, a pesar de las dificultades que se presentaron, se pudo llevar a cabo el ensayo dentro de las limitaciones; y con los datos registrados en el ensayo pudo ser posible obtener las conclusiones expuestas.

Sugerencias

1. Para un mejor monitoreo eléctrico del potencial, he visto conveniente realizar tres sugerencias: En primer lugar, se recomienda realizar un ensayo distinto para cada proveedor, empleando un solo recipiente; esto permitirá que se pueda monitorear el potencial, sin depender de las probetas de los demás proveedores. En segundo lugar, se podría realizar el ensayo empleando un solo recipiente para todos los proveedores. Por último, si en el mercado no se encontrase un recipiente lo suficientemente grande, se sugiere dividir en grupos, como se ha hecho en esta tesis, pero utilizando para cada bandeja un rectificador de corriente independiente.
2. Con el fin de obtener conclusiones más precisas y exactas, en cuanto a la resistencia al desprendimiento catódico de un recubrimiento en particular a un potencial, es recomendable que en este ensayo se cuente con más de tres probetas por proveedor, de tal manera que a cada probeta, se le otorgue un rango pequeño de potencial E2 distinto, que se encuentre dentro de lo que indica la norma ASTM G8, y mantener este rango estable hasta el final del período de prueba. En esto ayudaría también, el empleo de un reóstato conectado a cada probeta, de manera que se pueda regular el potencial individualmente para cada una de ellas, y se pueda definir el mínimo potencial para el cual se presenta el desprendimiento catódico del recubrimiento.
3. Para definir mejor las características del recubrimiento para un determinado proveedor, se deben seguir las recomendaciones de la norma de ensayo que sugiere la duración del mismo, por un período prolongado de 60 a 90 días. No obstante lo mencionado anteriormente, apreciamos que en el ensayo realizado se obtuvieron los registros necesarios en un período de 743 horas, rango que se aproxima al establecido por la norma ASTM G8 en 720 horas, y nos han permitido obtener conclusiones interesantes sobre el comportamiento de los recubrimientos evaluados.
4. El empleo de los recubrimientos de los proveedores con código 1, 2 y 3 (evaluados en la bandeja A) para una aplicación en servicio real, se sugiere un potencial que se encuentre por debajo de -1.5 V, para evitar las fallas que se presentaron en este ensayo debido al exceso de potencial.
5. En cuanto a la aplicación con los recubrimientos pertenecientes a los proveedores con código 4 y 8, se sugiere un potencial que se encuentre entre -1.4 V y -1.45 V, lo cual evitará la sobreprotección, reduciendo los costos de electricidad, y además se protegerá a la tuberías de la corrosión así como del desprendimiento catódico, sin problema.
6. Se recomienda que al momento de efectuarse la preparación superficial, exista una supervisión minuciosa y atenta, exigiendo se cumpla con lo establecido en las normas técnicas específicas. También hay que tener en consideración la planificación y organización del trabajo, para lograr una buena aplicación del sistema de recubrimiento, con el fin de entregar un trabajo bien hecho y eficiente, para evitar los problemas que se hicieron evidentes con en esta prueba.

7. Se sugiere hacer uso de una herramienta de limpieza superficial, llamada “Roto Peen Scaler”, la cual sirve para remover todo tipo de capas que estén sobre la superficie metálica. Se ha comprobado con este sistema de limpieza mecánica, que se puede obtener un alto nivel de rugosidad en la superficie del metal, que no se obtiene incluso con las herramientas mecánicas comúnmente usadas; esto permitiría un mejor anclaje de los recubrimientos, evitando el desprendimiento catódico a potenciales normales de protección.

Anexo A

SERIE GALVANICA¹

EXTREMIDAD PROTEGIDA CATODICA	METALES MAS NOBLES
	oro
	grafito
	plata
PASIVO	Acero inoxidable tipo 316
	Acero inoxidable tipo 310
	Acero inoxidable tipo 446
	Acero inoxidable tipo 304
	Acero inoxidable tipos 301 y 302
	Acero inoxidable tipo 434 y 430
PASIVO	80% Ni - 20% Cr
	Inconel
	60% Ni - 15% Cr
	Níquel
	Metal Monel
	Cuproníquel
	Bronce
	Cobre
	Latón
ACTIVO	80% Ni - 20% Cr
	Inconel
	60% Ni - 15% Cr
	Níquel
	Estaño
	Plomo
ACTIVO	Acero inoxidable tipo 316
	Acero inoxidable tipo 310
	Acero inoxidable tipo 304
	Acero inoxidable tipos 302 y 301
	Acero inoxidable tipo 446
	Acero inoxidable tipos 434 y 430
	Acero inoxidable tipo 410
	Fundición de hierro
	Cadmio
	Aluminio 2S
	Zinc
	Magnesio en aleaciones
	Magnesio
EXTREMIDAD CORROIDA ANODICA	METALES MENOS NOBLES

¹ Acerind S.C. "Resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables". 2006. <en línea>
<http://inoxidable.com/corrosion.htm>

Anexo B1

Prueba de medición de espesor ASTM G12

Planchas de acero

Probeta G8-04e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40.4
Ancho (h) cm.	10.2

Probeta G8-05e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	9.8

Nº Medición	Espesor (mils) ¹ Frente	Espesor (mils) Espalda
1	20.00	22.20
2	20.90	21.10
3	20.80	20.40
4	21.30	21.50
5	19.65	22.20
6	20.90	20.10
7	23.10	20.40
8	22.10	21.20
9	20.20	20.90
10	19.91	21.50
11	19.66	22.10
12	20.80	20.30
Promedio	20.78	21.16
Promedio Total	20.97	
Máximo	23.10	
Mínimo	19.65	
Desviación Estándar	1.03	
Tendencia	20.86	
Varianza	1.06	

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	18.88	22.20
2	17.48	21.10
3	17.71	19.62
4	17.69	20.60
5	19.21	19.89
6	18.04	19.31
7	18.09	21.10
8	18.54	16.68
9	18.12	19.58
10	18.36	22.00
11	17.55	20.20
12	18.59	17.80
Promedio	18.11	20.01
Promedio Total	19.10	
Máximo	19.21	
Mínimo	17.48	
Desviación Estándar	0.54	
Tendencia	18.15	
Varianza	0.30	

¹ 1mils = 0.0254 mm.

Probeta G8-06e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10.2

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	20.30	25.90
2	20.10	24.30
3	20.10	24.10
4	19.33	23.80
5	19.18	22.40
6	16.99	26.60
7	20.50	26.30
8	19.38	22.00
9	20.20	24.00
10	21.90	21.20
11	20.10	21.10
12	18.91	22.90
Promedio	19.75	23.72
Promedio Total	21.73	
Máximo	21.90	
Mínimo	16.99	
Desviación Estándar	1.17	
Tendencia	19.64	
Varianza	1.37	

Probeta G8-10e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40.4
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	17.92	21.00
2	19.62	23.60
3	18.92	21.60
4	20.40	24.10
5	21.00	21.20
6	19.73	20.80
7	19.18	22.20
8	19.50	23.00
9	18.93	22.10
10	19.45	23.30
11	20.00	21.00
12	18.51	21.20
Promedio	19.43	22.09
Promedio Total	20.76	
Máximo	21.00	
Mínimo	17.92	
Desviación Estándar	0.83	
Tendencia	19.41	
Varianza	0.69	

Probeta G8-11e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	21.40	21.60
2	27.30	21.80
3	25.20	23.20
4	30.00	21.10
5	22.10	20.20
6	23.80	22.50
7	26.30	23.00
8	25.00	20.80
9	26.40	22.40
10	25.80	21.90
11	24.00	21.10
12	23.10	22.60
Promedio	25.03	21.85
Promedio Total	23.44	
Máximo	30.00	
Mínimo	21.40	
Desviación Estándar	2.37	
Tendencia	25.29	
Varianza	5.64	

Probeta G8-12e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	21.10	20.20
2	25.50	21.60
3	26.10	22.80
4	27.60	24.00
5	27.10	22.90
6	27.80	22.30
7	27.80	22.10
8	29.40	22.60
9	23.80	23.20
10	19.65	23.20
11	26.20	23.10
12	28.90	19.61
Promedio	25.91	22.30
Promedio Total	24.11	
Máximo	29.40	
Mínimo	19.65	
Desviación Estándar	3.01	
Tendencia	25.24	
Varianza	9.05	

Probeta G8-16e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9.5
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	20.20	21.80
2	21.00	21.50
3	20.90	21.10
4	21.30	21.80
5	21.00	23.10
6	22.10	21.40
7	22.20	21.10
8	23.40	21.30
9	19.01	22.00
10	20.10	24.90
11	20.90	21.30
12	20.80	21.50
Promedio	21.08	21.90
Promedio Total	21.49	
Máximo	23.40	
Mínimo	19.01	
Desviación Estándar	1.12	
Tendencia	21.15	
Varianza	1.26	

Probeta G8-17e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8.5
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	18.81	23.90
2	19.16	21.10
3	20.90	18.24
4	23.90	18.33
5	22.30	18.28
6	21.10	23.20
7	22.00	19.76
8	22.20	19.41
9	21.50	18.34
10	18.70	20.10
11	20.10	18.41
12	20.10	21.20
Promedio	20.90	20.02
Promedio Total	20.46	
Máximo	23.90	
Mínimo	18.70	
Desviación Estándar	1.59	
Tendencia	20.98	
Varianza	2.53	

Probeta G8-18e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10.3

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	20.10	22.00
2	18.65	22.20
3	17.74	23.10
4	17.91	24.30
5	20.10	24.30
6	18.60	22.90
7	17.45	22.90
8	18.71	23.50
9	19.05	23.10
10	20.20	23.90
11	19.36	25.40
12	19.55	22.40
Promedio	18.95	23.33
Promedio Total	21.14	
Máximo	20.20	
Mínimo	17.45	
Desviación Estándar	0.94	
Tendencia	18.61	
Varianza	0.89	

Probeta G8-28e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9.5
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente
1	40.50
2	42.50
3	42.10
4	42.20
5	44.50
6	43.80
7	41.10
8	41.80
9	43.40
10	43.00
11	40.90
12	37.50
Promedio	41.94
Promedio Total	41.94
Máximo	44.50
Mínimo	37.50
Desviación Estándar	1.84
Tendencia	42.82
Varianza	3.39

Probeta G8-29e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9.8
Largo (l) cm.	40.3
Ancho (h) cm.	10.2

Nº Medición	Espesor (mils) Frente
1	40.90
2	40.90
3	42.10
4	42.00
5	40.60
6	41.60
7	44.80
8	44.80
9	41.10
10	42.00
11	42.50
12	41.40
Promedio	42.06
Promedio Total	42.06
Máximo	44.80
Mínimo	40.60
Desviación Estándar	1.40
Tendencia	41.47
Varianza	1.96

Probeta G8-30e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9.5
Largo (l) cm.	40.2
Ancho (h) cm.	10.1

Nº Medición	Espesor (mils) Frente
1	42.00
2	41.90
3	45.60
4	46.00
5	38.10
6	39.90
7	42.50
8	43.10
9	43.30
10	40.80
11	46.00
12	42.80
Promedio	42.67
Promedio Total	42.67
Máximo	46.00
Mínimo	38.10
Desviación Estándar	2.42
Tendencia	42.36
Varianza	5.86

Probeta G8-34e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	12
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10.5

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	76.10	57.60
2	69.10	69.10
3	71.60	48.10
4	75.50	57.10
5	78.60	57.50
6	80.50	48.50
7	70.10	59.80
8	61.90	49.00
9	74.30	57.10
10	71.10	53.40
11	71.40	60.20
12	63.10	57.40
Promedio	71.94	56.23
Promedio Total	64.09	
Máximo	80.50	
Mínimo	61.90	
Desviación Estándar	5.60	
Tendencia	75.64	
Varianza	31.34	

Probeta G8-35e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	12
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10.5

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	42.60	64.40
2	54.10	72.20
3	40.00	57.30
4	40.10	51.30
5	54.40	55.40
6	52.30	68.60
7	48.10	66.60
8	43.00	55.10
9	52.30	55.20
10	48.00	55.00
11	55.40	68.40
12	52.10	49.00
Promedio	48.53	59.88
Promedio Total	54.20	
Máximo	55.40	
Mínimo	40.00	
Desviación Estándar	5.75	
Tendencia	44.79	
Varianza	33.08	

Probeta G8-36e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	12
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10.5

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	49.90	43.60
2	50.50	59.80
3	48.20	57.40
4	55.40	58.00
5	51.40	49.50
6	37.60	48.10
7	52.50	60.50
8	60.60	57.10
9	61.20	51.80
10	58.60	52.60
11	50.80	54.60
12	58.50	57.80
Promedio	52.93	54.23
Promedio Total	53.58	
Máximo	61.20	
Mínimo	37.60	
Desviación Estándar	6.58	
Tendencia	48.29	
Varianza	43.28	

Probeta G8-40e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8.5
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	7.59	14.01
2	7.33	13.95
3	7.79	13.38
4	7.61	10.66
5	8.82	13.06
6	8.38	13.04
7	9.34	11.43
8	7.33	10.76
9	8.10	12.04
10	9.35	13.94
11	8.01	10.52
12	7.32	11.81
Promedio	8.08	12.38
Promedio Total	10.23	
Máximo	9.35	
Mínimo	7.32	
Desviación Estándar	0.74	
Tendencia	7.83	
Varianza	0.55	

Probeta G8-41e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8.5
Largo (l) cm.	40.3
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	11.62	10.68
2	10.83	10.11
3	9.73	12.23
4	9.41	8.61
5	11.44	10.64
6	10.20	10.19
7	11.12	10.05
8	10.42	9.60
9	9.14	10.54
10	9.45	8.69
11	11.49	9.98
12	11.41	8.04
Promedio	10.52	9.95
Promedio Total	10.23	
Máximo	11.62	
Mínimo	9.14	
Desviación Estándar	0.92	
Tendencia	10.56	
Varianza	0.84	

Probeta G8-42e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	9
Largo (l) cm.	40.3
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	9.89	10.32
2	14.03	14.34
3	10.80	9.91
4	12.45	10.59
5	13.21	14.82
6	14.29	12.10
7	14.03	11.58
8	12.81	14.01
9	13.76	15.43
10	11.29	8.41
11	12.39	7.21
12	16.48	12.79
Promedio	12.95	11.79
Promedio Total	12.37	
Máximo	16.48	
Mínimo	9.89	
Desviación Estándar	1.77	
Tendencia	11.68	
Varianza	3.15	

Probeta G8-46e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8.2
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	14.92	16.23
2	16.19	20.10
3	21.60	20.50
4	21.10	20.20
5	19.61	21.80
6	16.91	21.50
7	18.95	20.60
8	19.81	23.80
9	21.90	20.40
10	19.88	20.40
11	22.30	21.80
12	14.21	22.30
Promedio	18.95	20.80
Promedio Total	19.88	
Máximo	22.30	
Mínimo	14.21	
Desviación Estándar	2.77	
Tendencia	18.14	
Varianza	7.65	

Probeta G8-47e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	7.5
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	9.8

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	19.11	17.24
2	18.55	16.64
3	21.10	18.52
4	15.51	19.33
5	15.91	22.60
6	19.46	15.81
7	20.10	16.81
8	21.80	19.75
9	21.30	18.38
10	20.40	18.90
11	16.85	17.76
12	20.60	17.76
Promedio	19.22	18.29
Promedio Total	18.76	
Máximo	21.80	
Mínimo	15.51	
Desviación Estándar	2.12	
Tendencia	18.39	
Varianza	4.49	

Probeta G8-48e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8
Largo (l) cm.	40
Ancho (h) cm.	10

Nº Medición	Espesor (mils) Frente	Espesor (mils) Espalda
1	15.03	16.93
2	19.29	16.96
3	18.19	16.48
4	16.49	14.88
5	15.52	13.95
6	20.50	19.31
7	17.04	17.41
8	21.20	17.16
9	17.91	15.22
10	19.25	16.03
11	16.19	13.42
12	19.66	16.84
<i>Promedio</i>	18.02	16.22
<i>Promedio Total</i>	17.12	
<i>Máximo</i>	21.20	
<i>Mínimo</i>	15.03	
<i>Desviación Estándar</i>	2.00	
<i>Tendencia</i>	17.04	
<i>Varianza</i>	4.00	

TuberíasProbeta G8-C1e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	7
Altura (h) cm.	41
Diametro (D) cm.	6.2

Nº Medición	Espesor (mils)
1	80.00
2	84.60
3	80.00
4	81.30
5	80.00
6	80.00
7	80.00
8	79.20
9	80.00
10	80.30
11	80.00
12	77.60
<i>Promedio Total</i>	80.25
<i>Máximo</i>	84.60
<i>Mínimo</i>	77.60
<i>Desviación Estándar</i>	1.61
<i>Tendencia</i>	81.68
<i>Varianza</i>	2.60

Probeta G8-C2e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	8.5
Altura (h) cm.	41
Diametro (D) cm.	6.2

Nº Medición	Espesor (mils)
1	80.00
2	85.00
3	80.00
4	79.60
5	85.20
6	84.60
7	79.10
8	76.30
9	85.80
10	81.10
11	78.30
12	73.80
<i>Promedio Total</i>	80.73
<i>Máximo</i>	85.80
<i>Mínimo</i>	73.80
<i>Desviación Estándar</i>	3.78
<i>Tendencia</i>	83.08
<i>Varianza</i>	14.33

Probeta G8-C3e

Dimensiones	
Espesor (e) mm.	7.5
Altura (h) cm.	42
Diametro (D) cm.	6.2

Nº Medición	Espesor (mils)
1	73.50
2	75.10
3	74.10
4	77.50
5	70.90
6	80.20
7	74.30
8	82.90
9	72.20
10	75.00
11	82.40
12	75.60
<i>Promedio Total</i>	76.14
<i>Máximo</i>	82.90
<i>Mínimo</i>	70.90
<i>Desviación Estándar</i>	3.85
<i>Tendencia</i>	74.24
<i>Varianza</i>	14.85

Anexo B2

Prueba de detección de defectos ASTM G62

Planchas de acero

Probeta G8-04e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
20.776	525	2393.025	Fallas alrededor del agujero.	Presenta cortina y pandeo en ambas caras.

Probeta G8-05e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
18.188	525	2239.0085	Fallas alrededor del agujero.	Presenta cortina y pandeo en ambas caras.

Probeta G8-06e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
19.749	525	2333.101	Fallas alrededor del agujero.	Presenta cortina, pandeo y corrugado en ambas caras.

Probeta G8-10e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
19.435	525	2314.172	Ninguna.	Presenta corrugado en ambas caras.

Probeta G8-11e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
25.033	525	2626.749	3 fallas en la parte posterior.	Presenta defectos y cortina en ambas caras.

Probeta G8-12e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
25.912	525	2672.476	1 fallas en la parte posterior.	Presenta pandeo en cara frontal y defectos en ambas caras.

Probeta G8-16e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
21.075	525	2410.192	Ninguna.	Presenta defecto en cara frontal.

Probeta G8-17e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
20.897	525	2399.973	1 falla.	Presenta un defecto en cara posterior.

Probeta G8-18e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
18.951	525	2285.509	Ninguna.	Presenta ligero corrugado en ambas caras.

Probeta G8-28e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
41.941	1250	8095.298	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-29e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
42.058	1250	8106.549	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-30e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
42.666	1250	8164.965	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-34e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
71.941	525	4452.967	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-35e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
48.533	525	3657.458	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-36e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
52.933	525	3819.653	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-40e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
8.0808	525	1492.407	Fallas en toda la parte superior frontal.	Presenta pandeo, poros y cortina en toda la probeta.

Probeta G8-41e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
10.521	525	1702.948	8 fallas en la parte frontal y 2 en la parte posterior.	Presenta pandeo, poros, cortina y ojos de pescado en toda la probeta.

Probeta G8-42e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
12.952	525	1889.453	1 falla en la parte media frontal, además de toda la parte inferior frontal fallada.	Presenta pandeo, poros, ojos de pescado y cortina en toda la probeta.

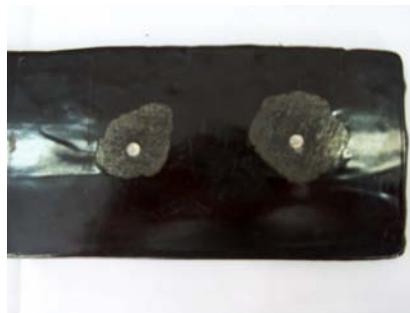
Probeta G8-46e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
18.948	525	2285.308	Ninguna.	Presenta microporos y pandeo en toda la probeta.

Anexo C

A continuación se muestran una serie de tablas con los cálculos aproximados de las dimensiones de las áreas desnudas, solamente de las probetas afectadas, en cada una de sus respectivas fallas artificiales. Debajo de cada una de estas tablas, se muestra la foto o las fotos correspondientes de la probeta afectada, en las cuales podremos apreciar la magnitud del daño al finalizar la prueba.

Probeta G8-04e	Área desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 861.259mm ² Falla inferior: 1291.985mm ²	No hubo.



Probeta G8-05e	Área desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 346.361mm ² Falla inferior: 726.499mm ²	201.062mm ²



Probeta G8-06e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 530.998mm ²	113.097mm ²
Falla inferior: 95.133mm ²		



Probeta G8-10e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	318.361mm ²	Falla superior: 1019.878mm ²
	Falla inferior: No hubo.	



Probeta G8-11e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 751.3131mm ²	110.097mm ²
Falla inferior: 1134.117mm ²		



Probeta G8-12e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 1320.257mm ² Falla inferior: No hubo.	16.635mm ²



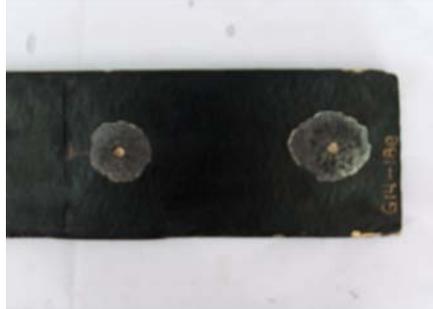
Probeta G8-16e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 1319.561mm ² Falla inferior: 706.249mm ²	4319.646mm ²



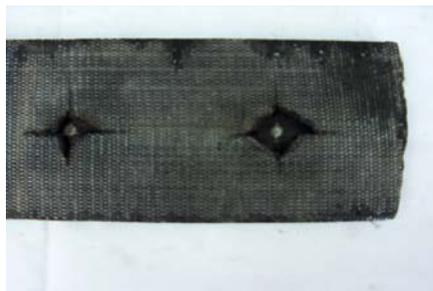
Probeta G8-17e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	1790.435mm ²	El área incluye la falla superior e inferior: 8770.875mm ²



Probeta G8-18e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	3216.998mm ²	Falla superior: 962.115mm ² Falla inferior: 1256.645mm ²



Probeta G8-29e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 132.732mm ² Falla inferior: 452.3904mm ²	No hubo.



Probeta G8-40e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 577.556mm ² Falla inferior: 201.062mm ²	No hubo.



Probeta G8-41e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 346.361mm ²	316.161mm ²
Falla inferior: 1661.906mm ²		



Probeta G8-42e	Area desnuda	
	Frente	Posterior
	Falla superior: 804.249mm ²	552.674mm ²
Falla inferior: No hubo.		



Probeta G8-47e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
19.224	525	2301.882	Ninguna.	Presenta microporos y pandeo en toda la probeta.

Probeta G8-48e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
18.022	525	2228.778	Ninguna.	Presenta microporos y pandeo en toda la probeta.

Tuberías**Probeta G8-C1e**

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
80.256	1250	11197.795	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-C2e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
80.733	1250	11231.466	Ninguna.	Ninguna.

Probeta G8-C3e

Tc (mils)	M	Voltios	Resultados del holiday detector	Observaciones
76.141	1250	10907.399	Ninguna.	Ninguna.

Anexo D

A continuación se muestran las tablas que contienen los registros de las resistencias eléctricas relativas tomadas en dos etapas distintas del ensayo, la inicial, que muestra los datos registrados antes de haberse hecho la falla artificial y la final que muestra los datos registrados a la culminación del ensayo. En ambas ocasiones se tomó un dato inicial y otro después de 15 minutos, como se puede apreciar en las tablas.

Probeta	Trial	Megaohms (MΩ)	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-04e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	8.25	8.53

Probeta	Trial	Megaohms (MΩ)	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-05e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.92	7.47

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-06e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	8.39	8.54

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-10e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.75	8.04

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-11e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.39	7.70

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-12e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.24	8.27

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-16e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.70	7.94

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-17e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.37	7.68

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-18e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.42	7.85

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-40e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.34	8.22

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-41e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.64	7.82

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-42e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.10	7.69

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-46e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.78	8.48

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-47e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.75	8.51

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-48e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	8.01	8.52

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-28e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	5.50	8.39

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-29e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.23	7.71

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-30e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.42	8.38

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
<i>G8-34e</i>	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.02	7.20

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
G8-35e	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.82	8.23

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
G8-36e	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	8.34	8.72

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
G8-C1e	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	6.97	8.58

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
G8-C2e	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.33	8.52

Probeta	Trial	Megaohms	
		<i>Inicial</i>	<i>Después de 15 minutos</i>
G8-C3e	<i>Inicio</i>	10.00	10.00
	<i>Final</i>	7.13	8.21

Anexo E

A continuación se muestran ocho tablas, una para cada proveedor, en las cuales están los datos registrados de la corriente de protección requerida por cada recubrimiento en particular, además de la densidad de corriente y el área circular donde se realizó la prueba. Se ha resaltado la tabla del proveedor con código 4, 6 y 8, pues son los que mejores resultados obtuvieron, al registrar las corrientes de protección mas bajas. En el caso del proveedor con código 4 hay que tener en cuenta que el área de prueba fue mayor.

<i>Proveedor código 1</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.032	0.636x10 ⁻³ μA/cm ²
			6.366x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 2</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.009	0.17904x10 ⁻³ μA/cm ²
			1.7904x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 3</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.008	0.159x10 ⁻³ μA/cm ²
			1.591x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 4</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	185.0402	0.124	0.6701x10 ⁻³ μA/cm ²
			6.701x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 5</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.082	1.631x10 ⁻³ μA/cm ²
			16.313x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 6</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.007	0.139x10 ⁻³ μA/cm ²
			1.392x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 7</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.014	0.278x10 ⁻³ μA/cm ²
			2.785x10 ⁻² A/m ²

<i>Proveedor código 8</i>	<i>Área (cm²)</i>	<i>Corriente (μA)</i>	<i>Densidad de corriente</i>
	50.265	0.007	0.139x10 ⁻³ μA/cm ²
			1.392x10 ⁻² A/m ²

Fotos ilustrativas

En las fotos A y B se puede apreciar a las probetas de los proveedores con código 8 y 5, donde se ilustra la forma de cómo se efectuó la medida de la corriente requerida de protección. De la misma manera se procedió para cada uno de las demás probetas. Una vez que se sumergía el ánodo de acero inoxidable y el electrodo de referencia, se dejaba unos minutos (aproximadamente 20 a 30 minutos) que se polarice el sistema y luego se anotaba la corriente que registraba el multimetro philips, como se aprecia en la foto C.



Foto A



Foto B



Foto C

Anexo F

A continuación se presentan las fotos que se tomaron a todas las probetas por ambos lados, frontal y posterior, luego de haberlas sacado de las bandejas y lavado cuidadosamente al momento que finalizó el ensayo.

Primeramente colocaremos las fotos de las probetas que sufrieron fallas debido al desprendimiento catódico:



Probeta G8-04e parte frontal.



Probeta G8-04e parte posterior.



Probeta G8-05e parte frontal.



Probeta G8-05e parte posterior.



Probeta G8-06e parte frontal.



Probeta G8-06e parte posterior.



Probeta G8-10e parte frontal.



Probeta G8-10e parte posterior.



Probeta G8-11e parte frontal.



Probeta G8-11e parte posterior.



Probeta G8-12e parte frontal.



Probeta G8-12e parte posterior.



Probeta G8-16e parte frontal.



Probeta G8-16e parte posterior.



Probeta G8-17e parte frontal.



Probeta G8-17e parte posterior.



Probeta G8-18e parte frontal.



Probeta G8-18e parte posterior.



Probeta G8-28e parte frontal.



Probeta G8-28e parte posterior.



Probeta G8-29e parte frontal.



Probeta G8-29e parte posterior.



Probeta G8-30e parte frontal.



Probeta G8-30e parte posterior.



Probeta G8-34e parte frontal.



Probeta G8-34e parte posterior.



Probeta G8-35e parte frontal.



Probeta G8-35e parte posterior.



Probeta G8-36e parte frontal.



Probeta G8-36e parte posterior.



Probeta G8-40e parte frontal.



Probeta G8-40e parte posterior.



Probeta G8-41e parte frontal.



Probeta G8-41e parte posterior.



Probeta G8-42e parte frontal.



Probeta G8-42e parte posterior.

Ahora colocaremos a las probetas que no presentaron desprendimiento catódico y por tanto tuvieron mejores resultados al terminar el ensayo:



Probeta G8-46e parte frontal.



Probeta G8-46e parte posterior.



Probeta G8-47e parte frontal.



Probeta G8-47e parte posterior.



Probeta G8-48e parte frontal.



Probeta G8-48e parte posterior.



Probeta G8-C1e parte frontal.



Probeta G8-C1e parte posterior.



Probeta G8-C2e parte frontal.



Probeta G8-C2e parte posterior.



Probeta G8-C3e parte frontal.



Probeta G8-C3e parte posterior.

Anexo G

A continuación se muestran las gráficas de variación de potencial ΔE_2 vs días (diferencia), mencionadas en el apartado 5.1.2.6 del capítulo V.

Gráfico G.1. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 1.

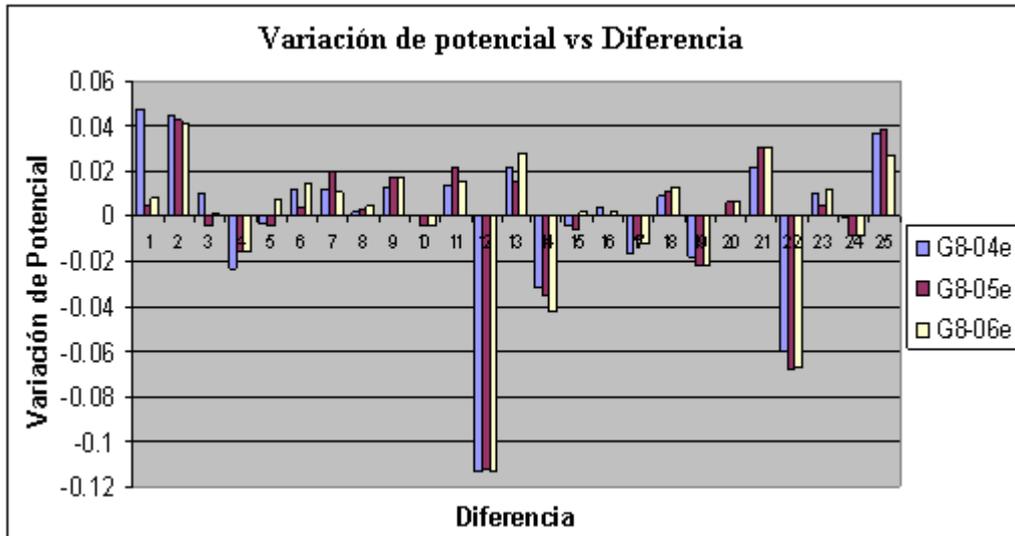


Gráfico G.3. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 2.

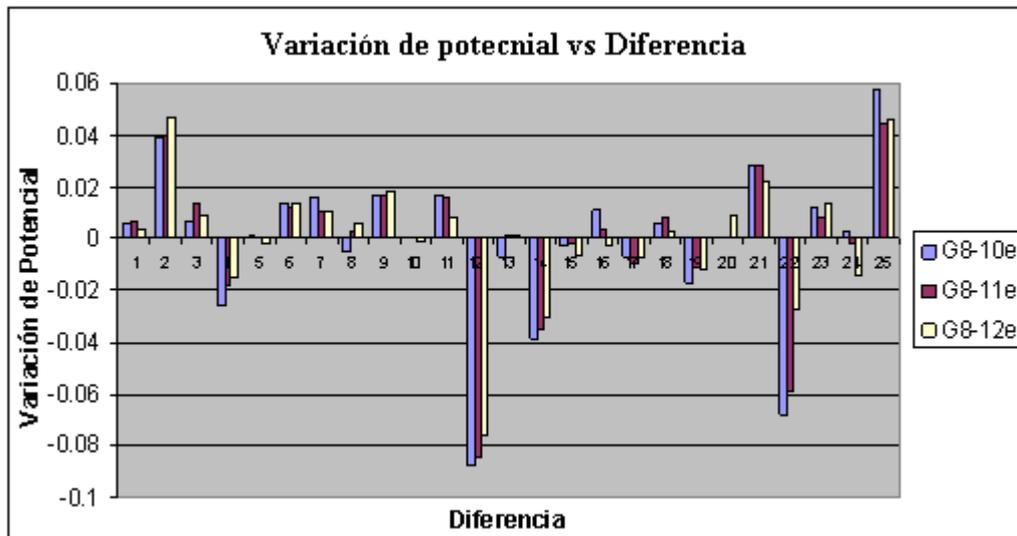


Gráfico G.2. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 3.

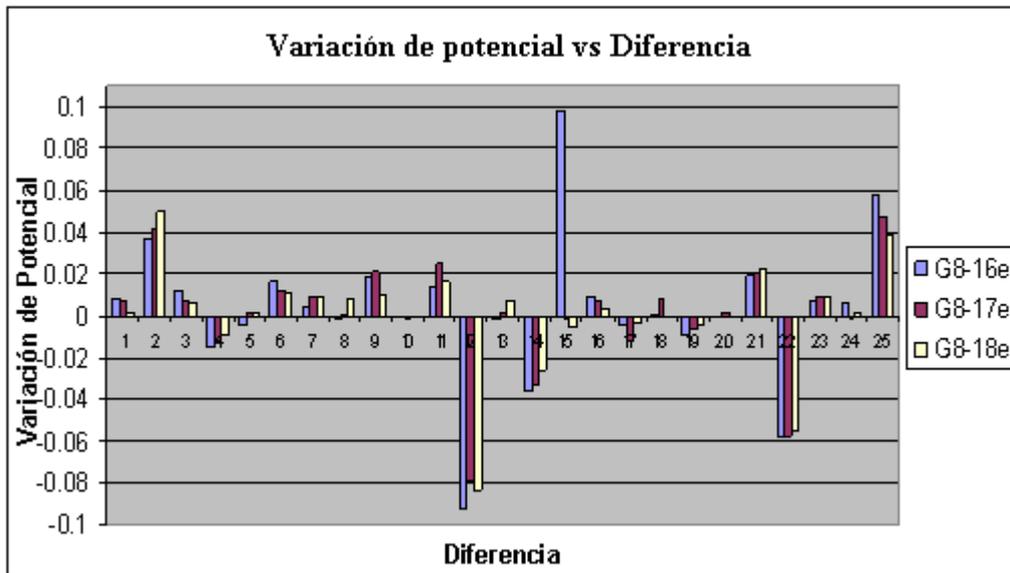


Gráfico G.4. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 7.

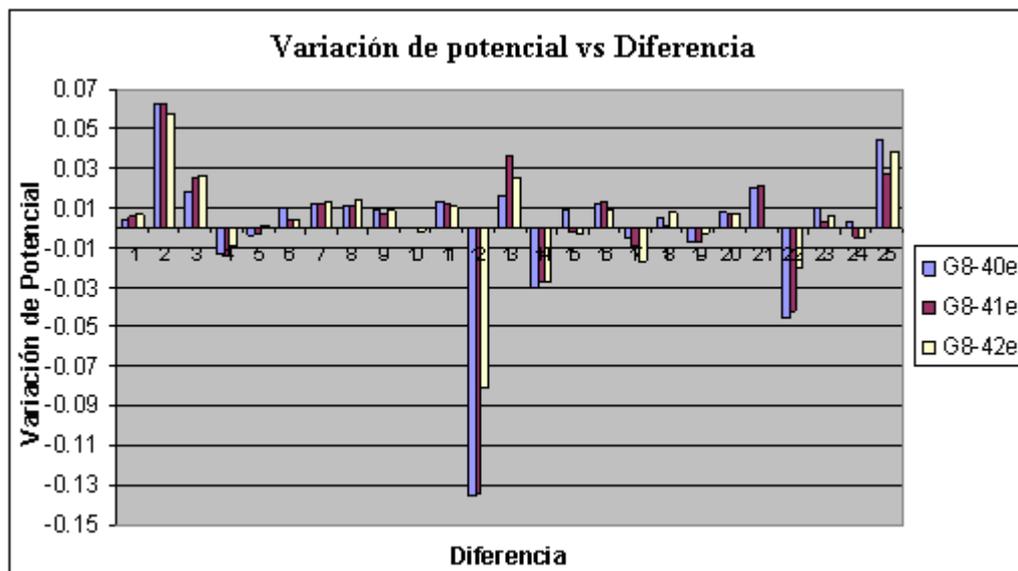


Gráfico G.5. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 8.

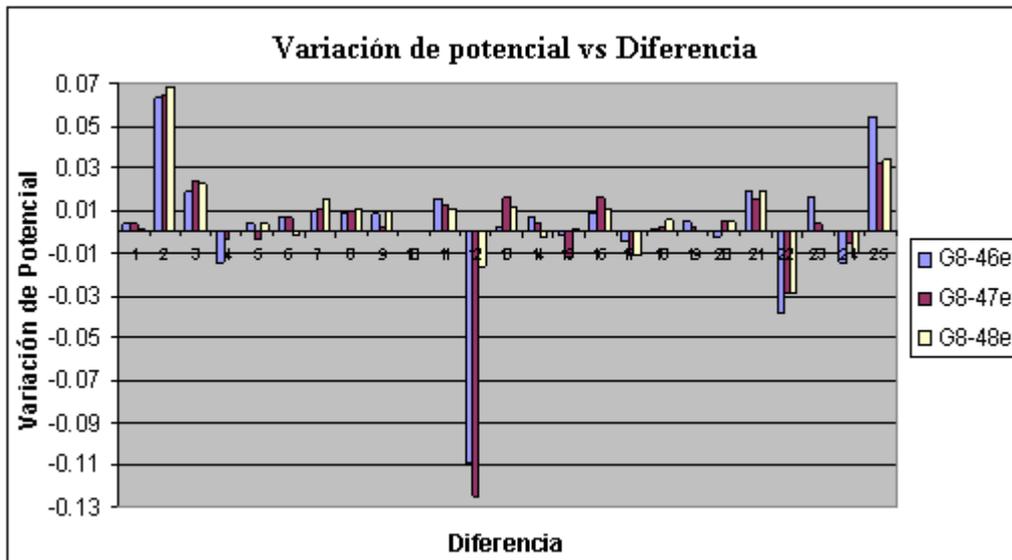


Gráfico G.6. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 6.

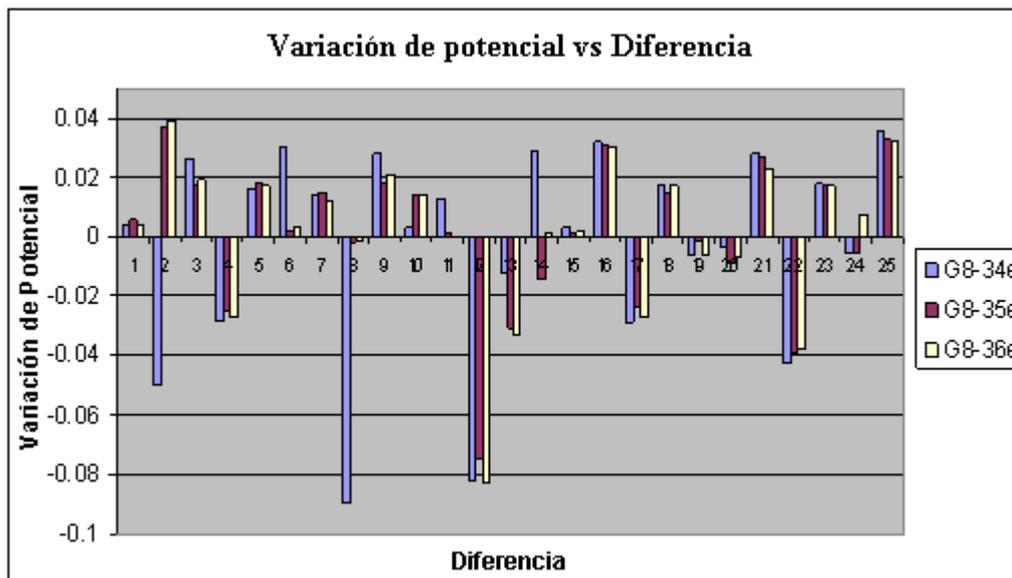


Gráfico G.7. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 5.

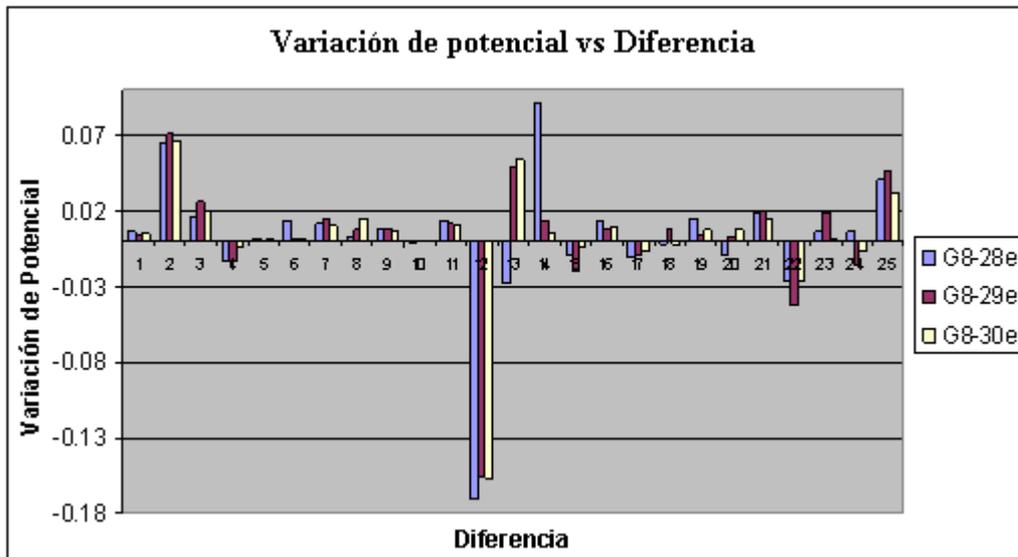


Gráfico G.8. Esta gráfica pertenece al proveedor - código 4.

