



CAPÍTULO 3. MÉTODOS DE PRUEBA Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN.

Las pruebas de corrosión se consideran la base para la evaluación y el posterior control del fenómeno en una gran cantidad de aplicaciones de ingeniería (Sheler et. al, 1995), (Ashworth, 1984). En la Figura 10 se ilustran los factores que intervienen en la evaluación de la corrosión y su importancia para poder controlarla. Para realizar la evaluación de corrosión es necesario determinar la velocidad de corrosión, la cual es una medida del grado de afectación del metal debida a reacciones de corrosión.

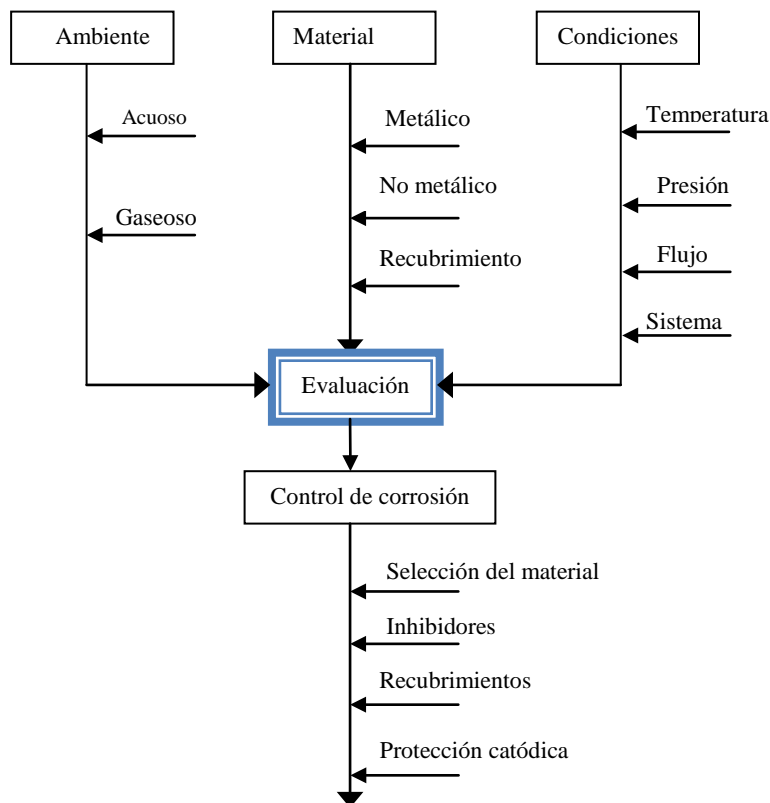


Figura 1. Importancia de la evaluación para el control de la corrosión (Ashworth, 1984)



Las pruebas de corrosión se pueden dividir, de forma general, en tres grandes grupos. El primero corresponde a las pruebas de laboratorio en las que las muestras son expuestas a líquidos de plantas reales o ambientes de éstas simulados (Perry y Green, 2003). En el segundo, se encuentran las pruebas en planta o campo en donde las pruebas se efectúan en ambientes reales exponiendo los metales o aleaciones a las condiciones presentes en los procesos. Por ejemplo, condiciones en la atmósfera, el mar, etc. Finalmente, el tercer grupo lo conforman las pruebas de servicios. En este tipo de prueba los materiales a estudiar, que en algunas veces se elaboran tomando la forma de piezas de proceso, se exponen a las condiciones específicas en las serán usados en los procesos reales (Sheler et. al, 1995). De forma general, las muestras de metal que se emplean para determinar la velocidad de corrosión se denominan testigos o cupones.

3.1 Pruebas de laboratorio

Las pruebas de corrosión de laboratorio son métodos importantes para entender el comportamiento de los metales y aleaciones en diferentes ambientes corrosivos. Muchas de las teorías de corrosión que existen en la actualidad se han desarrollado a partir de este tipo de pruebas (Lai, 1990).

A pesar de ello, las pruebas de laboratorio presentan desventajas. En algunas ocasiones este tipo de pruebas no simulan de manera exacta el ambiente y las condiciones de operación del sistema real. Por otra parte, su duración es relativamente corta en comparación con el tiempo de vida al que se diseñan los equipos en los procesos industriales. Este hecho trae consigo la necesidad de extrapolar los resultados para tener una predicción del comportamiento de los materiales en un determinado ambiente de proceso. El mayor problema con la extrapolación de los resultados en una prueba de corrosión es que no es posible predecir el punto de quiebre del proceso de corrosión en el sistema.



3.1.1. Método de pérdida de peso

El método de pérdida de peso relaciona el daño causado por la corrosión con pérdida de peso en los materiales. Las pruebas de inmersión total que emplean el método de pérdida de peso consisten en exponer piezas pequeñas de metal a ambientes corrosivos, para determinar la pérdida de peso del material después de la pruebas (NACE, 1984).

Este método es uno de los más usados en estudios de oxidación y corrosión para determinar el grado de afectación en los metales. Esto se debe a que los resultados obtenidos por este método son considerados confiables, al asemejarse a resultados obtenidos en pruebas de en planta; si se cuidan las condiciones al realizar las pruebas (Perry & Green, 2003). Las pruebas de corrosión mediante el método de pérdida de peso se consideran el método más rápido y satisfactorio para hacer una selección preliminar de los mejores materiales en estudio para una determinada aplicación (Roberge, 2000)

Existen diferentes aparatos para determinar la velocidad de corrosión mediante este método. Los aparatos que determinan de forma continua el peso del testigo son muy populares en academia para realizar estudios de corrosión (Lai, 1990). Lo anterior se debe a que pueden recopilarse datos de la cinética de la reacción. Por otro lado, la principal desventaja es que sólo una muestra o testigo puede ser analizado en cada corrida, lo cual hace que el generar datos comparativos para varios tipos de sistemas y materiales sea un proceso largo.

3.1.2 Resistencia eléctrica

Las pruebas de corrosión por medio de resistencia eléctrica se basa en los cambios en la resistencia de piezas metálicas o alambres de los materiales por efecto de la disminución del su sección transversal, por la pérdida de peso de metal. Existen equipos comerciales como el Corrosometer® que se emplean para llevar a cabo pruebas de corrosión mediante este método. Las pruebas consisten en exponer las muestras al ambiente para que el equipo grabe de forma periódica las lecturas; traduciendo la velocidad de corrosión como la pérdida de peso del metal entre cada dos lecturas.



Las principales ventajas de este tipo de pruebas es que pueden llevarse a cabo en periodos de tiempo cortos, además de que los estudios pueden realizarse en exposiciones a gases corrosivos, la velocidad de corrosión se puede determinar sin tener que realizar observaciones a la muestra ni retirarla del equipo. Además el método puede detectar velocidades de corrosión bajas, las cuales requerirían periodos prolongados para su determinación por el método de pérdida de peso.

La desventaja más importante de este método es que no es posible determinar si existe corrosión localizada. Asimismo, si el producto de corrosión presenta una conductividad eléctrica cercana a la del metal, los resultados indicaran una velocidad de corrosión pequeña o nula. Además es importante mencionar que no se pueden realizar este tipo de pruebas si el ambiente es un electrolito.

3.1.2 Métodos electroquímicos

3.1.2.1 Resistencia a la polarización lineal

La resistencia a la polarización lineal (RPL) es un método que se emplea para la determinar la velocidad de corrosión. El método consiste en la aplicación de un sobrepotencial, respecto del potencial de equilibrio, lo suficientemente pequeño como para no alterar el sistema pero suficiente como para poder conocer cuál es el comportamiento del electrodo en ese medio frente a las reacciones de oxidación y de reducción. De esta forma, se puede seguir la evolución del proceso de corrosión con el tiempo. Este método asume que la corrosión electroquímica se predice de forma correcta por la ecuación clásica de Stern-Geary (Ecuación 1) (Hakka et. al, 1995).

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{R_p 2.3(b_a + b_c)}$$

Ecuación 1

donde: i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión, R_p es la resistencia a la polarización y b_a y b_c son constantes para el metal.



La principal ventaja de la polarización lineal es que es un método no destructivo. Otra ventaja es que pueden estimarse valores de resistencia a la corrosión y ésta convertirse a velocidades de corrosión, permitiendo determinar la rapidez con la que se corroerá el metal o estimar la vida útil del mismo. Mediante la ecuación de Stern-Geary se pueden relacionar la resistencia a la corrosión y la corriente de corrosión para polarización lineal, pudiéndose transformar ésta última en velocidad de corrosión. Entre las desventajas que presenta este método se encuentran el que únicamente mide corrosión general, además de que resulta complicado obtener los datos para metales que presentan índices de corrosión bajos.

3.1.3 Procedimientos y recomendaciones para realizar pruebas de corrosión en laboratorio por método de pérdida de peso.

3.1.3.1 Preparación de la superficie

Cuando se realizan pruebas de corrosión para predecir el comportamiento de un metal en un determinado ambiente, lo deseable sería que la superficie de los testigos asemejara a la de los materiales empleados en los procesos o servicios. Sin embargo, debido a que existen diferentes condiciones en los metales empleados en ingeniería es grande, incluso dentro de un mismo tipo, no sería práctico evaluar cada una de dichas condiciones (Lai, 1990). Por ello el mejor procedimiento en la práctica es elegir una determinada condición de superficie para los testigos que pueda ser reproducida a lo largo de las pruebas. Adicionalmente, es recomendable que la superficie de los testigos no presente raspaduras ya que estos sitios representan sitios de ataque preferencial (Sheler et. al, 1995). Se pueden esperar resultados con mayor uniformidad, si se retira una capa significativa de la superficie del metal, con el fin de eliminar las raspaduras o variaciones en las condiciones de la superficie metálica original. Lo anterior se puede lograr mediante tratamiento químico, eliminación electrolítica o esmerilado con un paño o papel de liga fuerte (Perry y Green, 2003).



En cuanto a las dimensiones y forma de los testigos no existe una estándar. El tamaño y la forma de estos varían de acuerdo a la finalidad de la prueba, la naturaleza del material y el equipo que se utilice. A pesar de ello, se recomienda que en las dimensiones de los testigos exista una relación grande de superficie a masa y una relación pequeña de área del borde con respecto al área total (Sheler et. al, 1995). En la Figura 11 se muestran algunos tipos testigos para pruebas de corrosión (Corrosion Test Specimens, 2008)

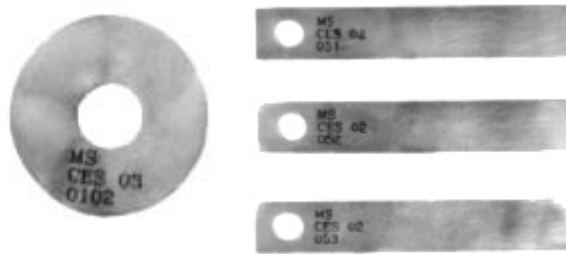


Figura 2. Tipos de testigos de corrosión

Después de la manufactura de los testigos y el acondicionamiento de los testigos es necesario realizar su limpieza antes de ser empleados en las pruebas. Los testigos se deben desengrasar para remover cualquier suciedad, aceite o grasa que pueda interferir en las pruebas de corrosión. Esto se puede lograr mediante el pulido con polvo limpiador, seguido por el enjuagado completo en un disolvente apropiado, pudiendo ser acetona, metanol, por mencionar algunos. Otro de los cuidados que debe darse a los testigos es el colocarlos en un desecador hasta el comienzo de las pruebas en caso de no emplearlos de forma inmediata (Perry y Green, 2003).

3.1.3.2 Marcado de los testigos para identificación

La forma más simple para identificar a los testigos es marcarlos con letras o números. El marcado puede realizarse mediante estampado con un estencil o sello. Además, si se realiza la prueba a un gran número de testigos, se aconseja tener un historial de la posición relativa entre ellos o en el dispositivo de soporte que se emplee para realizar las pruebas. (Sheler, Jarman, y Burstein, 1995)



3.1.3.3 Volumen de la solución

El volumen empleado de solución a estudiar es un aspecto que se debe considerar al realizar las pruebas de corrosión. Es recomendable que el volumen sea lo suficientemente grande para evitar cambios apreciables de corrosión a causa del agotamiento de los constituyentes corrosivos o a la acumulación de productos de corrosión que pudieran afectar el avance de la misma.

La Norma ASTM G31-03 recomienda que la relación de volumen de la disolución con el área de exposición de testigos sea de $40 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ (ASTM, 2003). Otra porción es adecuada de dicha relación es de 20 cm^3 de solución por cm^2 de superficie de la muestra. Dicha recomendación corresponde a la norma A262 ASTM para el ensayo de Huey (Perry y Green, 2003).

3.1.3.4 Número de testigos

En algunos casos las recomendaciones prácticas limitan el número de testigos a emplearse en las pruebas de corrosión. Se recomienda emplear por lo menos dos testigos o cupones para evaluar la velocidad de corrosión de determinado sistema. Para efectos estadísticos, es recomendable usar al menos cinco testigos para un mismo sistema (Perry y Green, 2003).

3.1.3.5 Duración de la prueba

La duración de una prueba de corrosión está influenciada por la naturaleza del mismo y su finalidad. Los materiales que experimentan efectos de corrosión importantes no requieren de tiempos prolongados para obtener velocidades de corrosión precisas, aunque existen excepciones. La formación de películas protectoras se observa en muchos de los materiales resistentes a la corrosión. Debido a ello, el realizar ensayos cortos con este tipo de materiales puede arrojar resultados no muy precisos de velocidad de corrosión. De forma general, se recomienda que la duración de las pruebas sea prolongada para obtener datos más reales que los que se pudieran obtener en pruebas cortas.



Si las velocidades de corrosión esperadas son bajas o moderadas, se puede emplear la Ecuación 2, para calcular el tiempo de duración de las pruebas (Sheler et. al, 1995).

$$\text{Duración de la prueba}(h) = \frac{78.74}{\text{Velocidad de corrosión (mmy)}}$$

Ecuación 2

donde 78.74 es una constante de ajuste de unidades y *mmy* corresponde a milímetros por año.

Uno de los procedimientos que se pueden llevar a cabo para evaluar el efecto del tiempo sobre la corrosión del metal, y la corrosividad del ambiente, en las pruebas de laboratorio es la técnica de ensayo de intervalo temporal predefinido. Existen otros métodos para determinar la duración de las prueba; sin embargo, estos requieren la remoción de los productos sólidos de corrosión y no miden con exactitud las variaciones normales del fenómeno durante el tiempo.

3.1.3.6 Limpieza de las muestras después de las pruebas

Al finalizar las pruebas de corrosión es importante realizar una inspección visual de la apariencia de los testigos. En las observaciones, se deben considerar la formación de productos de corrosión, así como la deposición de dichos productos en los testigos. Lo anterior, con el fin de evaluar la corrosión localizada, por picaduras o el ataque en celdas de concentración que se puedan presentar en la superficie de los testigos. Realizada la inspección visual, los testigos deben ser sometidos a un procedimiento de limpieza.

La limpieza de los testigos posterior a las pruebas es uno de los procedimientos de mayor importancia en el desarrollo experimental de las pruebas de corrosión. De forma general, el procedimiento de limpieza debe retirar todos los productos de corrosión de los testigos con una eliminación mínima de la superficie no atacada. Si la limpieza no se realiza adecuadamente, los resultados de velocidad de corrosión pueden resultar erróneos.



No existen reglas fijas para la forma en que se debe realizar la limpieza de los testigos después de las pruebas, los procedimientos varían dependiendo el tipo de metal y el grado de adherencia de los productos de corrosión. Existen tres tipos principales de limpieza de testigos:

- *Limpieza mecánica:* Este tipo de limpieza remueve los productos de corrosión mediante procedimientos mecánicos. Entre dichos procedimientos se encuentra el raspado, cepillado, desbaste, el choque mecánico y el ultrasonido. El método más empleado en este tipo de limpieza es cepillar la superficie de los testigos con abrasivo suave. Los otros métodos se emplean como complemento.
- *Limpieza química:* La limpieza química implica la eliminación de material de la superficie de los testigos por disolución con algún agente químico apropiado. De forma general, se emplean disolventes como acetona, tetracloruro de carbono y alcohol para eliminar restos de aceites, grasas o resinas. En la norma ASTM G31 se reportan diferentes soluciones de limpieza química dependiendo del tipo de aleación o metal.
- *Limpieza electrolítica:* Este tipo de limpieza se realiza después de la remoción de productos de corrosión adheridos débilmente mediante frotación. La limpieza electrolítica consiste en formar con el testigo una celda de corrosión electrolítica, a determinadas condiciones de temperatura e intensidad de corriente, y en presencia de inhibidores orgánicos. Existen diferentes métodos de limpieza electrolítica dependiendo el tipo de metal que se éste estudiando; sin embargo, uno de los métodos más útiles para una gran cantidad de metales y aleaciones se encuentra reportado en la norma ASTM G1 03.

Independientemente del tipo de tratamiento que se emplee para la limpieza de los testigos después es necesario determinar el efecto de pérdida en la superficie del metal. Para ello, antes de la prueba de corrosión y después de la limpieza posterior a ésta, es necesario determinar la masa de los testigos con el fin de establecer la pérdida de masa.



3.1.3.7 Lista de verificación de datos importantes en las pruebas de corrosión

La siguiente lista de verificación es una guía reportada en el Manual del Ingeniero Químico (Perry y Green, 2003) para describir la información y los datos a recabar adecuados al realizar pruebas de corrosión tomada.

- Medios corrosivos y su concentración
- Volumen de la solución a estudiar
- Temperatura
- Aireación
- Agitación
- Tipo de equipo utilizado para las pruebas
- Duración de las pruebas
- Composición química o nombre comercial de los metales a evaluar
- Forma y condiciones metalúrgicas de los testigos de corrosión
- Tamaño exacto, forma y área de los testigos de corrosión
- Número de testigos de cada material y ubicación
- Método empleado para la limpieza posterior a las pruebas.
- Pérdidas de peso
- Evaluación del daño por corrosión
- Velocidad de corrosión de los testigos evaluados.



3.2 Pruebas en planta

Las pruebas de corrosión en plantas se diseñaron debido a que en algunos casos resulta difícil identificar cuáles son las condiciones en los procesos y reproducirlas en el laboratorio. Estos casos incluyen a los procesos en los que existen cambios de composición y otras características físicas de las soluciones, mientras transcurre el proceso como son la evaporación, destilación, polimerización, o la síntesis. Por otra parte, las pruebas en planta se desarrollaron debido a que en las pruebas de laboratorio la solución de estudio puede contaminarse con productos de corrosión lo cual puede producir cambios en las propiedades corrosivas de dicha solución.

Para las pruebas en planta, en algunos casos se seleccionan materiales que se encuentran en la fase de desarrollo, los cuales aún han sido empleados en la construcción de plantas pero que se desean evaluar para su posible selección en un proceso. Este tipo de pruebas se puede realizar en una planta piloto, donde además de evaluar la velocidad de corrosión de los testigos para la elección del material, es posible verificar que las condiciones de operación del propio proceso sean las adecuadas. Por otro lado, existen otras pruebas en planta en las que los testigos son colocados en líneas de tuberías.

En las pruebas de corrosión en planta un los aspectos a considerar más importante es el tipo de testigos o cupones que se emplean, sus características superficiales, el material de construcción de los soportes y la forma en que los testigos son colocados en estos últimos. En la Figura 12 se muestra un diagrama de los soportes para pruebas de corrosión en líneas de tuberías, de tipo carrete. El armazón está diseñado para poder colocarlo en el interior de la tubería en cualquier posición.

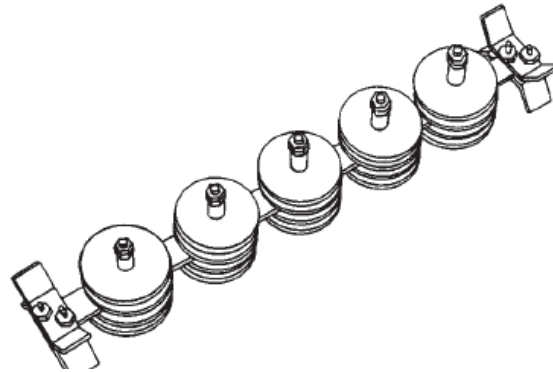


Figura 3. Soporte de testigos tipo carrete para uso en pruebas de corrosión en tuberías (Perry y Green, 2003).

En el caso de las pruebas en tuberías otra forma de estudiar la corrosión es instalando, en las líneas, tramos cortos de tubería de los materiales a estudiar. De forma general estos tramos se aíslan con materiales no metálicos para evitar corrosión galvánica entre los diferentes metales. En algunas ocasiones no se emplean soportes para colocar los testigos para las pruebas de corrosión en planta, los cuales también deben aislarse.

3.3 Evaluación de corrosión con microfotografías

Existen un gran número de pruebas que permiten examinar los productos de corrosión formados en los testigos antes de la limpieza posterior a las pruebas. Una de las técnicas analíticas más modernas empleadas para el análisis de los productos de corrosión e incrustación es el microscopio de barrido de electrones (SEM), el cual es probablemente el equipo más utilizado para la inspección de muestras de corrosión. Este equipo puede estar equipado con un espectrofotómetro de energía dispersiva de rayos X o de energía de onda larga de los mismos; para desarrollar de forma cuantitativa o cualitativa un análisis químico del un área seleccionada de las muestras de corrosión. Empleando este dispositivo es sencillo generar información acerca de la distribución elemental del área analizada como es la sección transversal de de la incrustación de productos de corrosión o la penetración interna (Lai, 1990).