

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

**TRANSPORTE Y DISTRIBUCIÓN DE
HIDROCARBUROS**

**Notas Introductorias a la Teoría y Práctica de la
Protección contra la Corrosión en Cañerías Metálicas**

Notas Introductorias a la Teoría y Práctica de la Protección Contra la Corrosión en Cañerías Metálicas

INDICE

1 Teoría Básica de la Corrosión en Estructuras Enterradas.....	4
1.1 Introducción	4
1.2 Teoría elemental de Nernst.....	6
1.3 Detección de la corrosión y medición de potenciales.....	10
1.4 Resistividad del terreno.....	15
1.4.1 Caracterización de suelos	15
1.4.2 Métodos de medición de la resistividad	16
1.5 Velocidad de corrosión.....	20
1.6 Formación de películas de óxido y corrosión atmosférica	22
1.7 Mecanismos de corrosión en cañerías metálicas	25
1.7.1 Heterogeneidad de la superficie metálica	25
1.7.2 Heterogeneidad del electrolito	26
1.7.3 Contacto de metales diferentes	27
1.7.4 Influencia de campos eléctricos externos	28
1.7.5 Acción bioquímica	30
1.7.6 Otros mecanismos de corrosión	31
1.8 Morfología de la corrosión	34
2 Pinturas y Revestimientos Anticorrosivos.....	38
2.1 Consideraciones generales	38
2.2 Clasificación y propiedades de los revestimientos anticorrosivos	43
2.3 Sistemas de pinturas como protección anticorrosiva.....	50
2.3.1 Recubrimientos de pintura.....	50
2.3.2 Tipos de pigmento.....	52
2.3.3 Mecanismos de protección de la película de pintura	52
2.3.4 Esquemas de pinturas.....	53
2.3.5 Procedimientos de pintado	54
2.3.6 Esquemas para la protección de instalaciones de superficie	55

3 Técnicas de Protección Catódica	58
3.1 Consideraciones generales	58
3.2 Sistemas galvánicos	59
3.2.1 <i>Fundamentos</i>	59
3.2.2 <i>Procedimiento de cálculo</i>	60
3.2.3 <i>Instalación de ánodos galvánicos</i>	62
3.3 Sistemas de corriente impresa.....	64
3.3.1 <i>Fundamentos</i>	64
3.3.2 <i>Procedimiento de cálculo</i>	65
3.3.3 <i>Tipos de dispersores</i>	73
3.3.4 <i>Recomendaciones para la instalación de dispersores</i>	76
3.4 Elementos de aislación eléctrica	78
3.4.1 <i>Puntos de separación eléctrica.....</i>	79
3.5 Criterios de protección catódica.....	81
3.5.1 <i>Definición</i>	81
3.5.2 <i>Interpretación de lo establecido en las Normas N.A.G.-100</i>	83
3.6 Métodos para la medición de potenciales eléctricos	83
3.6.1 <i>Método de medición ON-OFF.....</i>	85
3.6.2 <i>Método de medición de los potenciales naturales o estáticos.....</i>	87
3.6.3 <i>Instrumentos utilizados para la medición del potencial</i>	88
3.7 Tensiones eléctricas inducidas y corrientes de falla	90
3.7.1 <i>Proximidad de las cañerías a líneas de alta y media tensión.....</i>	91
3.7.2 <i>Descargas atmosféricas</i>	92
3.7.3 <i>Proximidad a sistemas electrificados de corriente continua</i>	93

1 Teoría Básica de la Corrosión en Estructuras Enterradas

1.1 Introducción [1]

La corrosión puede definirse en términos generales como la degradación de un material por interacción con el ambiente. Esta definición abarca virtualmente cualquier tipo de material, tanto natural como artificial e incluye plásticos, cerámicos y metales. De hecho, el fenómeno de la corrosión reviste una diversidad y complejidad tal que, al día de hoy, no se cuenta con una teoría única y acabada que pueda dar cuenta del mismo en todas sus variantes e interrelaciones con otros mecanismos de degradación físico-química.

Considerada como fenómeno destructivo, la corrosión es causante directa o indirectamente de accidentes y pérdidas materiales de una magnitud tal que a menudo resultan sorprendentes para quien no se encuentra familiarizado con este campo de la industria.

A modo de ejemplo, sólo en los Estados Unidos de Norteamérica se estima que los costos directos ocasionados por la corrosión durante 1998 alcanzaron los 276,000 millones de dólares, equivalentes al 3.1 % del PBI de esa nación. También se estima, conservadoramente, que los costos indirectos pueden haber representado otro 3 % adicional del PBI (Ref. [0])

Desprovista de una protección anticorrosiva adecuada, una estructura enterrada o sumergida puede provocar muchas dificultades de mantenimiento, obligando incluso en ciertos casos a la interrupción o alteración del servicio que presta. Aún más preocupantes son las consecuencias eventualmente acarreadas desde el punto de vista de la seguridad y el medio ambiente, cuando el debilitamiento y colapso de una estructura corroída provoca pérdidas de gas, hidrocarburos o sustancias nocivas, incendios, explosiones, contaminación ambiental, etc.

En nuestro caso, nos limitaremos a considerar la corrosión externa de estructuras metálicas, con especial énfasis en cañerías de acero al carbono y aceros de baja aleación destinadas al transporte y distribución de hidrocarburos, particularmente gas natural.

La definición dada anteriormente nos conduce a una pregunta obvia, aunque no necesariamente trivial: ¿por qué se corroen los materiales, en particular los metales? Más aún, ¿cuál es la tasa o velocidad de corrosión de los metales? Y ¿cuánto puede llegar a ser la vida útil de una cañería de acero sometida a este proceso de degradación? Finalmente, ¿cómo podemos evitar o al menos mitigar sus efectos – potencialmente nefastos - sobre las estructuras metálicas?

La respuesta a la primera interrogante yace en los fundamentos mismos de la termodinámica, más específicamente en la llamada “Segunda Ley” o “Ley de la Entropía”. Una cantidad muy importante de energía es transferida a los metales durante los procesos industriales de extracción, refinamiento y conformación, llevándolos a un estado energético relativamente elevado con

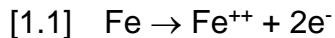
respecto a su estado mineral original. Los minerales de origen, tal como se los encuentra en la naturaleza, están constituidos generalmente por óxidos metálicos tales como hematita (Fe_2O_3) en el caso del hierro, o bauxita ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$) para el aluminio.

Según se deriva de la Segunda Ley de la Termodinámica, todo material tiende a evolucionar de modo de alcanzar un nivel energético mínimo, a menos que dicha tendencia sea contrarrestada por medio de algún mecanismo de inhibición exógeno, que generalmente implicará un consumo energético adicional. Por lo tanto, la mayoría de los metales de uso estructural son termodinámicamente inestables y exhibirán una tendencia a retornar a su nivel de energía más bajo, esto es, un óxido o algún otro componente más estable, liberando la energía incorporada en la estructura cristalina durante su manufactura. El proceso por medio del cual los metales se convierten en óxidos de baja energía constituye precisamente el fenómeno de la corrosión metálica.

En la mayoría de los metales de uso industrial o tecnológico operando a temperaturas cercanas a la normal ambiente, la corrosión se produce en un medio acuoso o húmedo y reviste naturaleza electroquímica. Dicho medio se conoce como electrolito, y en el caso de una estructura enterrada se trata del propio suelo húmedo.

1.2 Teoría elemental de Nernst [2]

El proceso de corrosión implica la pérdida de electrones (oxidación – Ecuación [1.1]) por parte del metal que se corroe y la ganancia de los mismos (reducción) por parte de otro elemento o sustancia, por ejemplo reducción de agua o de oxígeno (Ecuaciones [1.2] y [1.3], respectivamente):



La reacción de oxidación y la superficie o región del metal donde la misma tiene lugar es llamada “anódica”, mientras que la reacción de reducción y la región metálica correspondiente se denominan “catódica”. Ambas reacciones electroquímicas son imprescindibles para que tenga lugar el proceso de corrosión. La oxidación es la causante de la pérdida real de metal asociada al fenómeno en la zona que se corroe, pero la reacción de reducción debe producirse necesariamente para consumir los electrones liberados por la oxidación, asegurando así la conservación de una carga eléctrica total neutra. De lo contrario, se desarrollaría rápidamente una carga negativa en la interfase entre el electrolito y la zona anódica del metal, inhibiendo de este modo la reacción y deteniendo el proceso.

Las reacciones anódica y catódica también son llamadas individualmente “reacción de media celda” (“half-cells”) o “media reacción”, puesto que el proceso global es análogo al que se produce en una cubeta o celda electrolítica, conformada por dos electrodos metálicos inmersos en una solución electrolítica y conectados respectivamente a los polos positivo y negativo de una fuente de corriente continua.

En la práctica, las reacciones anódica y catódica pueden producirse localmente en el mismo metal, o bien, pueden estar físicamente separadas y/o ubicadas sobre distintos metales (estructuras) vinculadas por un conductor eléctrico e inmersas en el medio electrolito. Cuando las reacciones tienen lugar en regiones separadas del metal se dice que se ha establecido una celda diferencial de corrosión (Figura 1.1)

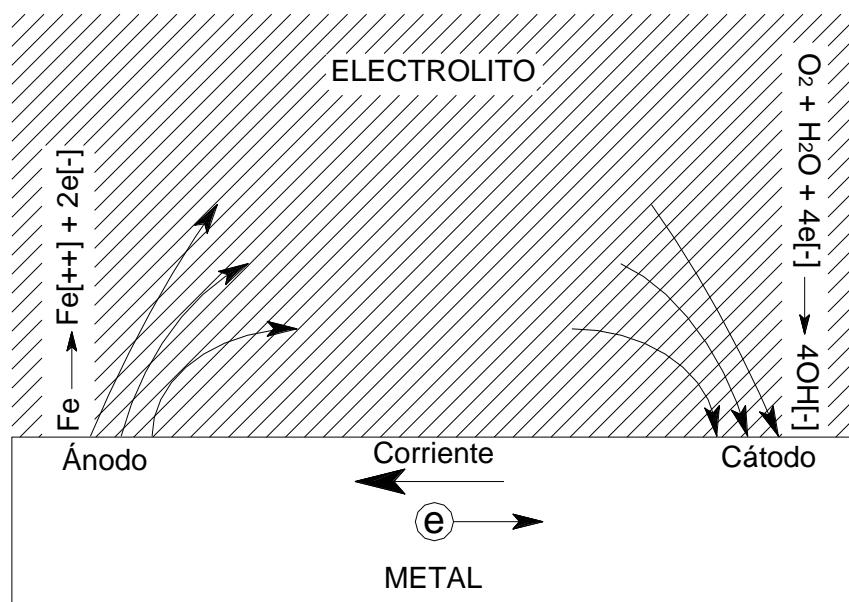


Figura 1.1: Representación esquemática de una celda diferencial de corrosión

Este concepto reviste para nosotros una gran importancia desde el punto de vista práctico, puesto que algunos de los mecanismos de corrosión más comunes y/o severos en cañerías enterradas o sumergidas implican la formación de celdas diferenciales de corrosión (Sección 1.7)

Sin embargo, debe observarse que no todos los procesos de corrosión están asociados a una celda como la descripta. Por ejemplo, un trozo de metal de composición homogénea, aislado eléctricamente de otras estructuras metálicas e inmersas en un medio acuoso o húmedo que contenga iones reductores podrá corroerse y desarrollar una película superficial de óxido más o menos homogénea; tal es el caso de la corrosión atmosférica que afecta a cualquier estructura metálica sometida a la intemperie sin una adecuada protección anticorrosiva externa. La transferencia de partículas (O_2 , e^- , Me^{+n}) para alimentar las reacciones de reducción y oxidación de producirá, en estos casos, a través de la propia película superficial de óxido.

Resumiendo lo anterior, resulta claro que existen numerosas configuraciones posibles que conducen al establecimiento de un proceso de corrosión, aunque en todas ellas es posible identificar cuatro elementos básicos que deben coexistir para que dicho proceso sea viable:

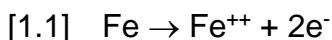
- Una región catódica o “pasiva”, protegida de la corrosión.
- Una región anódica o “activa” sometida a corrosión.
- Un material con características de conductor eléctrico que vincule ambas regiones. A menudo, en el caso de cañerías metálicas enterradas o sumergidas, dicho conductor viene constituido por la propia cañería.
- Un medio conductor o electrolito en contacto con las superficies anódica y catódica. Cuando nos referimos a estructuras metálicas enterradas o sumergidas dicho medio lo constituye, respectivamente, el suelo húmedo o el agua.

La actividad de una celda de corrosión vendrá gobernada, entre otros, por los siguientes factores [5]:

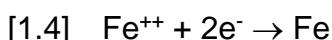
- Propiedades electroquímicas de los metales anódico y catódico (eventualmente coincidentes)
- Condición de las superficies anódica y catódica.
- Características del medio electrolito y de las especies iónicas que contiene en solución.
- Diferencias de concentración iónica entre zonas alejadas del medio electrolito pero en contacto con una misma estructura.
- Aireación del medio electrolito (contenido de O₂)
- Temperatura del medio electrolito.
- Presencia de sustancias agresivas (ácidos, álcalis, contaminación orgánica, hidrocarburos, etc.)
- Actividad bacteriana.
- Presencia de campos eléctricos y circulación de corriente a través del medio electrolito y/o de la propia estructura metálica.

Según se desprende de las Ecuaciones [1.1] a [1.3], la oxidación representa una pérdida de electrones por átomo o grupo de átomos (deselectronización), al tiempo que la reducción, por el contrario, implica una ganancia de electrones por átomo o grupo de átomos (electronización)

De acuerdo con la Ecuación [1.1], el hierro metálico pierde dos electrones; se convierte en ion positivo que entra en solución o se combina, siguiendo el caso, con un ion negativo que pueda encontrar en el medio electrolito (corrosión del hierro [3]):



Por el contrario, en una reacción de reducción, el ión hierro captará dos electrones para convertirse en metal hierro:



Estas consideraciones nos sugieren que para impedir que se produzca la corrosión de los metales es necesario oponerse a cualquier pérdida de electrones, ya sea por medios mecánicos (aislación dieléctrica y revestimientos anticorrosivos) o electroquímicos (inversión de la polaridad) Según veremos en los capítulos siguientes, ambas técnicas son usadas, generalmente en forma complementaria, para implementar un sistema efectivo de protección contra la corrosión.

Otra observación que debemos destacar en este punto, por constituirse en una regla mnemotécnica de gran aplicación práctica, refiere al hecho de que el daño por corrosión (es decir, la degradación y pérdida de metal en la región anódica) se produce únicamente en las zonas donde una corriente eléctrica neta, considerada con signo positivo, abandona la superficie metálica e ingresa al medio electrolito (ver Figura 1.1)

Se pueden disponer los elementos metálicos en una lista ordenada de acuerdo a su capacidad para reducir los iones de otros metales, siendo el más reductor el que figura en primer lugar de la lista. De este modo, cada metal puede reducir los iones de los metales colocados por debajo de él en la lista, pero el caso inverso es imposible.

Si a la lista anterior se le agregan los potenciales estándares o “normales” de reducción (es decir, la fuerza electromotriz de una celda electroquímica construida y operando en condiciones estándar [4]) se obtendrá la llamada *Escala de Nernst*, representada en la Tabla 1.1.

En la escala de Nernst, un metal dado se dice que es más “noble” que cualquier otro que le procede en sentido descendente. De este modo, en un proceso corrosivo que involucre metales disímiles, por ejemplo hierro y magnesio, el más noble de ellos (hierro) actuará como cátodo de la celda de corrosión y estará protegido de la degradación, en detrimento del metal menos noble (magnesio) que asumirá el papel de ánodo de sacrificio, consumiéndose en el proceso. De hecho, éste es el fundamento de una de las técnicas básicas de protección activa contra la corrosión de metales.

Potencial Estándar de Reducción (EEH [*], T = 25 °C, C = 1 M)		
Metal	Catión	E°_{red} (mV)
Oro	Au ⁺	+ 1,079
Platino	Pt ⁺⁺	+ 863
Plata	Ag ⁺	+ 771
Mercurio	Hg ⁺⁺	+ 750
Cobre	Cu ⁺⁺	+ 329
Hidrógeno H ₂	2H ⁺	0
Plomo	Pb ⁺⁺	- 148
Estaño	Sn ⁺	- 192
Níquel	Ni ⁺⁺	- 228
Hierro	Fe ⁺⁺	- 340
Zinc	Zn ⁺⁺	- 770
Aluminio	Al ⁺⁺⁺	-1,280
Magnesio	Mg ⁺⁺	- 1,490

EEH: Electrodo Estándar de Hidrógeno [4]

Tabla 1.1: Escala de Nernst para metales de uso corriente

1.3 Detección de la corrosión y medición de potenciales [1]

La naturaleza electroquímica del proceso corrosivo constituye el fundamento de las técnicas aplicables para su detección y mitigación. La idea básica consiste en medir y analizar los potenciales y corrientes asociadas al fenómeno.

Cuando un trozo de metal depositado en el seno de un medio electrolito (tal como suelo húmedo o agua de mar) se corroa, se establece una diferencia de potencial a través de la interfase (superficie metálica – electrolito) debido a la circulación de cargas eléctricas que se produce en la misma:

- Cationes (iones positivos) Fe^{++} que abandonan la superficie anódica e ingresan al electrolito.
- Cationes de especies presentes en el electrolito (iones metálicos Me^{+n} , cationes hidrógeno H^+ , etc.) que migran hacia la superficie catódica alimentando reacciones de reducción.

Si bien en la práctica es imposible medir directamente este voltaje, resulta sin embargo sencillo determinar, con ayuda de un voltímetro apropiado, la diferencia de potencial entre dos superficies metálicas en contacto con el medio electrolito.

También es posible determinar directamente la diferencia de potencial entre la superficie metálica y un electrodo de referencia en contacto con el electrolito. Dicho electrodo, denominado comúnmente “hemipila” ha sido estandarizado para las distintas aplicaciones de uso generalizado, y sustituye en la práctica al electrodo normal de hidrógeno empleado para confeccionar la escala de Nernst, sólo utilizado en trabajos de laboratorio.

En ambientes terrestres (estructuras enterradas o en contacto con el suelo) la hemipila de uso común es la de cobre - sulfato de cobre ($\text{Cu} - \text{CuSO}_4$), constituida por un electrodo de cobre electrolítico puro (99.99 % Cu) en solución saturada de sulfato de cobre (ver Figura 1.2). Dicha elección se basa en una serie de ventajas prácticas y operativas que ofrece esta combinación, entre ellas su simplicidad, bajo costo relativo y estabilidad química. Una característica que reviste gran importancia (tal como veremos a continuación) radica en la relativa independencia del potencial propio de la hemipila con respecto al tipo de suelo sobre el que se realiza la medición.

Nota Importante: El sulfato de cobre (CuSO_4) es una sustancia venenosa, y como tal, exige considerar todas las precauciones pertinentes para su manejo. En particular, se recomienda un lavado de manos a conciencia luego de manipular recipientes que contienen o contuvieron esta sustancia, los cuales deben almacenarse siempre fuera del alcance de niños y debidamente identificados.

Para aplicaciones marinas (cañerías submarinas, plataformas de exploración y producción, etc.) suele emplearse una hemipila de plata – sulfato de plata ($\text{Ag} - \text{AgSO}_4$), dada su mayor estabilidad en ambientes acuosos.

Virtualmente toda medición técnica de potenciales asociados a fenómenos de corrosión y sistemas de protección catódica están referidos a una hemipila estándar, debiendo especificarse cuál de ellas es utilizada a fin de que los valores numéricos obtenidos puedan ser comparados.

De lo anterior, se deduce la conveniencia de elaborar una escala de series galvánicas análoga a la de Nernst pero incluyendo los potenciales determinados con una hemipila estándar. La Tabla 1.2 indica los valores de potencial normalmente observados en suelos neutros y agua, medidos con respecto al electrodo normalizado ($\text{Cu} - \text{CuSO}_4$). El procedimiento básico de medición en campo se ilustra esquemáticamente en la Figura 1.2. Los valores de potencial para cada metal varían ligeramente en función de las propiedades químicas del medio electrolito (acidez, conductividad, humedad, composición química, etc.), sin embargo la posición relativa de los distintos metales en la serie permanecerá invariante.

Potenciales de Óxido-Reducción (referidos al electrodo estándar $\text{Cu} - \text{CuSO}_4$)	
Material	Potencial mV
Carbono, grafito, carbón	+ 300
Platino	0 a - 100
Herrumbre superficial sobre acero	- 200
Hierro de fundición al silicio	- 200
Cobre, latón, bronce	- 200
Acero dulce en concreto	- 200
Plomo	- 500
Hierro fundido (no grafitizado)	- 500
Acero dulce (oxidado)	- 200 a - 500
Acero dulce (sup. limpia y arenada al metal blanco)	- 500 a - 800
Aluminio comercial puro	- 800
Aleación de aluminio (5% Zinc)	- 1,050
Zinc	- 1,100
Aleación de magnesio (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	- 1,600
Magnesio comercial puro	- 1,750

Tabla 1.2: Serie galvánica de uso práctico para materiales en suelos neutros y agua [1]

Es importante observar que la lectura obtenida por este método (ΔV_{ON}) incluye la caída de potencial a través de la interfase de contacto de la hemipila con el electrolito (ΔV_H), las caídas óhmicas de potencial en los cables de conexión y contactos auxiliares (ΔV_c), así como en el electrolito (ΔV_{OHM}) además del potencial en la interfase entre el electrolito y la superficie de la cañería o estructura evaluada (ΔV_{Cs}):

$$[1.5] \quad \Delta V_{ON} = \Delta V_H + \Delta V_C + \Delta V_{OHM} + \Delta V_{CS}$$

La razón para utilizar el subíndice “ON” en la ecuación [1.5] se verá claramente más adelante [7]. Por ahora, es suficiente destacar que el parámetro de importancia para la evaluación del proceso corrosivo es el voltaje ΔV_{CS} , por lo cual resulta conveniente eliminar o al menos independizarse de los restantes términos. De hecho, si asumimos que la circulación de corriente a través del terreno o medio electrolito en cuestión es insignificante, resulta $\Delta V_{OHM} \approx 0$. Por otra parte, la utilización de instrumentos de calidad adecuada garantizará, a todos los efectos prácticos, que $\Delta V_C = 0$. La ecuación anterior se simplifica entonces según:

$$[1.6] \quad \Delta V_{OFF} = \Delta V_H + \Delta V_{CS}$$

Donde la notación ΔV_{OFF} indica que dicho valor corresponde al voltaje total del circuito (diferencia de potencial en la interfase cañería – suelo más el potencial electroquímico de la hemipila [6]) cuando no existe circulación de corriente apreciable en el medio electrolito [7]. Ahora resulta claro cuál es el significado exacto de la expresión “potencial de la cañería medido con respecto a un electrodo de referencia”; en efecto, si utilizamos una hemipila estándar, por ejemplo ($Cu - CuSO_4$), el término ΔV_{CS} será aproximadamente constante en todas las mediciones, por lo cual los valores obtenidos serán comparables. Es evidente que la propiedad de que el potencial asociado a la hemipila de referencia permanezca invariante para un rango lo más amplio posible de tipos de terrenos o medios acuosos es altamente conveniente, tal como se mencionara más arriba.

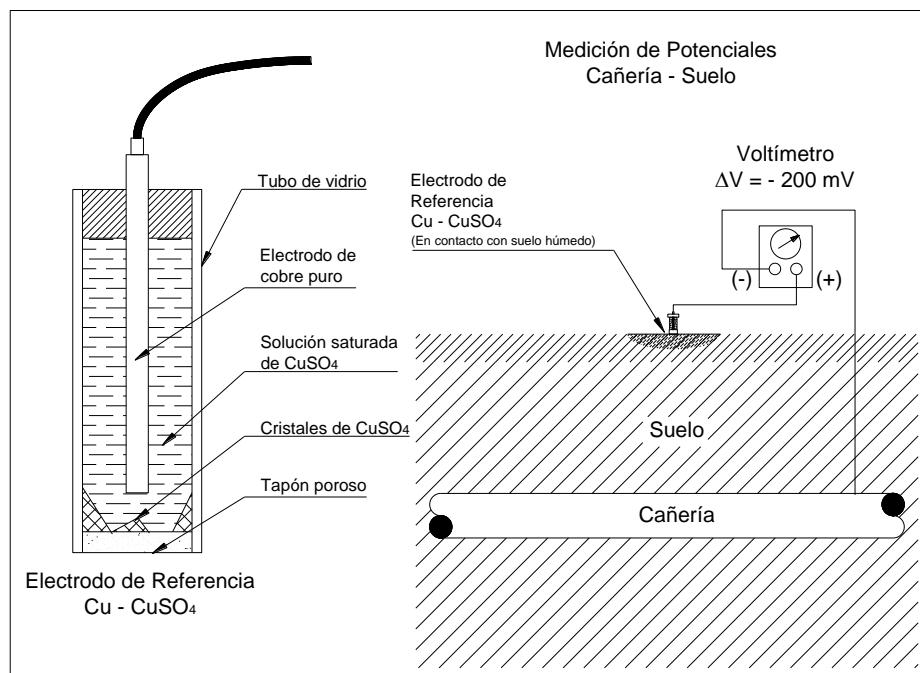


Figura 1.2: Medición de potenciales cañería – suelo y representación de un electrodo estándar de referencia cobre – sulfato de cobre

Otra aplicación inmediata de la medición de potenciales es la de establecer la posibilidad de ocurrencia de corrosión galvánica por contacto de metales disímiles en el seno de un medio electrolito (por ejemplo, soldadura de accesorios, válvulas, derivaciones, etc. sobre una cañería, o entre sí), pues ya sabemos que en tal caso el miembro más negativo o “activo” de la pareja (el que se encuentra más abajo en las Tablas 1.1 o 1.2) actuará como ánodo de la celda diferencial de corrosión, al tiempo que el más positivo o “noble” asumirá el rol de cátodo. En términos generales, la severidad del proceso corrosivo en el metal anódico se incrementará con la diferencia de potenciales entre ambos metales (es decir, cuanto más separados se encuentran en la Escala de Nernst), aunque existen excepciones a esta regla.

Observando la Tabla 1.2, se concluye que si consideramos, por ejemplo, dos piezas metálicas de acero dulce y cobre respectivamente, acopladas eléctricamente y en contacto con el suelo, enterradas, sumergidas, o en una atmósfera húmeda, el cobre quedará protegido de la corrosión por ser catódico o “noble” con respecto al acero, el cual, a su vez, sufrirá un proceso de degradación corrosiva más o menos acelerada.

La Tabla 1.2 también muestra que el potencial del acero diferirá dependiendo del estado de la superficie (es decir, si está cubierta superficialmente de herrumbre por simple contacto con el ambiente o, por el contrario, si la capa superficial de óxido y otros tipos de contaminantes ha sido removida mediante un energético cepillado, uso de abrasivos o arenado). Tal como aclararemos antes, el potencial del acero también será función de las propiedades del suelo o medio que lo rodea, incluyendo resistividad, índice de acidez (pH), concentración de iones y oxígeno, y contenido de humedad en el terreno. Las diferencias de potencial originadas por la variación natural o artificial de estos parámetros a lo largo de la traza de una cañería provocarán la formación de celdas de corrosión diferencial entre secciones más o menos alejadas de un mismo conducto [8].

En el Capítulo 3 retomaremos el tema de la corrosión galvánica y las celdas de corrosión diferencial en cañerías enterradas. Por ahora, nos interesa destacar que las medidas de potencial cañería – suelo ΔV_{ON} y ΔV_{OFF} son utilizadas rutinariamente para detectar y evaluar la evolución de estos procesos.

A tales efectos, se instalan “cajas” o “estaciones” de medición de potenciales distribuidas a lo largo de las trazas de cañerías enterradas, consistentes en un gabinete que alberga uno o más contactos eléctricos con conductores de cobre soldados directamente a la superficie metálica de la cañería.

Para efectuar la medición en ductos terrestres, normalmente se conecta el polo negativo de un voltímetro digital a la cañería a través de la caja de contactos, mientras que el polo positivo se conecta a la hemipila conteniendo el electrodo de referencia utilizado.

Esta hemipila posee un tapón poroso que se pone en contacto con la superficie del terreno, previamente humedecida para asegurar un buen

contacto eléctrico, buscando posicionar el electrodo directamente sobre la cañería, a la menor distancia posible de la superficie (como veremos más adelante, se logra así minimizar las caídas óhmicas de potencial en mediciones “ON” y mitigar el efecto de corrientes continuas vagabundas, telúricas o de falla que eventualmente pueden circular a través del terreno)

Con esta configuración, la lectura obtenida mostrará el signo correcto, es decir, negativo en el caso de la mayoría de los metales en contacto con suelos húmedos o medios acuosos [9]; dentro de una misma estructura (por ejemplo, a lo largo de un tramo extendido de cañería) las regiones con potenciales más negativos serán anódicas con respecto al resto de la estructura, por lo que estarán sometidas a un proceso corrosivo acelerado debido a la formación de celdas de corrosión.

1.4 Resistividad del terreno

1.4.1 Caracterización de suelos

Ya hemos hecho referencia a la agresividad del medio en el cual se encuentra instalada una estructura metálica, como factor determinante del fenómeno de la corrosión.

También hemos mencionado algunas de las variables características que definen el grado de agresividad del medio, tales como acidez, resistividad, presencia de contaminantes orgánicos e inorgánicos, actividad bacteriana, etc.

En esta sección nos ocuparemos de definir en términos más rigurosos la resistividad del terreno y analizar algunos de los métodos más comunes para su medición; éste último aspecto puede complementarse recurriendo a la Bibliografía recomendada al final de la obra, particularmente la Ref. [28] Debemos aclarar que la elaboración de perfiles longitudinales y, algunas veces, verticales (en profundidad) constituye una tarea preliminar básica para el diseño de un sistema de protección anticorrosiva.

En términos generales, podemos decir que cuanto más conductor es un suelo, más agresivo resultará para una estructura metálica enterrada en el mismo. Esta capacidad para conducir cargas eléctricas puede cuantificarse a través de la medición de su magnitud inversa, es decir, su *resistividad específica* (ρ), definida como la resistencia que el material constitutivo del suelo opone al pasaje de corriente entre dos caras opuestas de un cubo cuya arista mide 1 cm de largo. Las unidades de uso común para ρ serán los $\Omega \cdot \text{cm}$.

En función del valor de resistividad, se ha establecido la escala de agresividad de suelos resumida en la Tabla 1.3, de uso práctico a los efectos de una primera estimación de dicho parámetro, pero que deberá complementarse con mediciones detalladas de las restantes variables involucradas en este concepto:

Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}$	Naturaleza del Suelo	Ejemplos
0 ... 500	Extremadamente agresivo	Agua de mar Suelos salinos
500 ... 1×10^3	Muy agresivo	Fangos limosos
1×10^3 ... 2×10^3		Arcillas, margas, turba, tierra negra.
2×10^3 ... 5×10^3	Agresivo	
5×10^3 ... 1×10^4	Moderadamente agresivo	Horizonte A (capa fértil superficial)
$> 1 \times 10^4$	No agresivo (o protector)	Arenas lavadas, calizas

Tabla 1.3: Escala de agresividad de suelos

1.4.2 Métodos de medición de la resistividad

Método de Wenner o “de los cuatro puntos”

Las técnicas más sencillas y difundidas para determinar la resistividad del terreno se basan en la utilización de electrodos hincados en el suelo a través de los cuales se impone una diferencia de potencial y se mide la corriente que circula en el terreno como consecuencia de la misma.

En las inmediaciones de cada electrodo existe una zona conocida como *área de resistencia* en la cual se concentra el 90% de la resistencia del circuito, debido a que la superficie de conducción es muy pequeña (sobre el propio electrodo coincide con la superficie del mismo en contacto con el suelo) y crece rápidamente a medida que nos alejamos del electrodo.

Esta *resistencia de contacto* es mucho mayor que la propia resistencia del terreno y enmascararía su valor si se utilizasen simplemente dos electrodos para implementar la medición.

Por esta razón, se emplea el llamado *Método de Wenner* (Figura 1.2) basado en el empleo de cuatro electrodos alineados y equi-espaciados conectados a un resistivímetro de cuatro polos. Los dos electrodos centrales se conectan a los bornes de potencial (P1 y P2) y los electrodos exteriores a los bornes de corriente (C1 y C2); de este modo, el instrumento puede cancelar las resistencias de contacto y proveer una lectura directa de la resistencia óhmica asociada a la circulación de corriente a través del terreno.

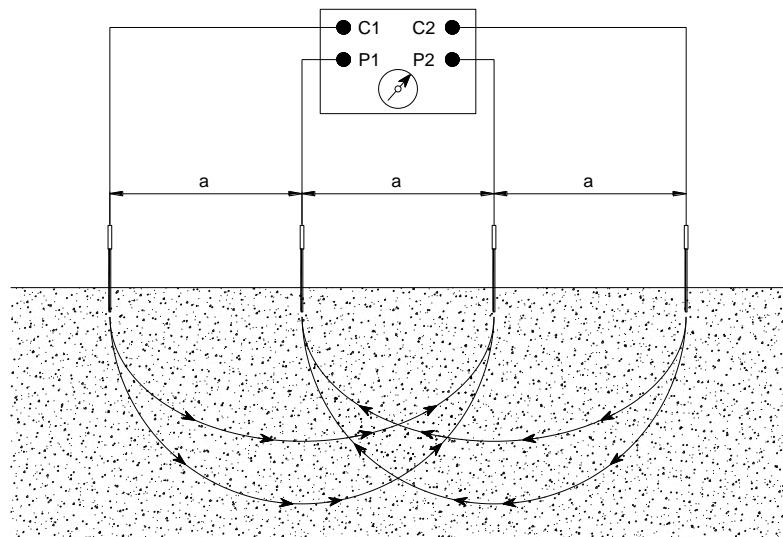


Figura 1.2: Medición de la resistividad por aplicación del Método de Wenner

El resistivímetro cuenta con dos bobinas antagónicas, una de ellas oficia de amperímetro y la otra de voltímetro, resultando de esa diferencia una escala logarítmica. También existen equipos en los que la determinación de resistencias se realiza a través de un puente, hallando el equilibrio con un

instrumento de lectura cero. En todos los casos se utiliza corriente alterna a fin de evitar problemas de polarización en los electrodos.

A modo de electrodos, se emplean jabalinas de acero, cobre o bronce, hincadas hasta una profundidad aproximada de 1/20 de su longitud y preferentemente a una distancia mínima de 5 metros con respecto a cualquier estructura de acero enterrada, pues de lo contrario podría afectarse la medición; de este modo, el área de resistencia se minimiza y las superficies equi-potenciales en torno a los puntos de contacto pueden asumirse hemisféricas. La distancia de separación entre las jabalinas (a) equivale a la profundidad de terreno cuya resistividad (ρ) se desea determinar, calculándose su valor a partir de la expresión:

$$[1.7-a] \rho[\Omega \cdot \text{cm}] = 2a[\text{cm}] \pi R[\Omega]$$

donde R es la lectura de resistencia suministrada directamente por el instrumento.

En este punto, debe aclararse que el Método de Wenner proporciona un valor de resistividad media de la capa de terreno limitada entre la superficie del suelo y el plano ubicado a una profundidad igual a la distancia de separación entre las jabalinas. Ello resulta normalmente adecuado para elaborar perfiles longitudinales de resistividad a lo largo de la traza de un gasoducto provisto de una tapada media de uno o dos metros, puesto que no es de esperar grandes variaciones en las capas superficiales de suelo (salvo ante presencia de napas superficiales o formaciones muy heterogéneas)

Medición con “caja de suelos”

El empleo de las *cajas de suelos* permite determinar la resistividad de muestras extraídas a distintas profundidades, resultando de utilidad especialmente en aquellos casos donde no se dispone del espacio suficiente para desplegar en línea recta los electrodos requeridos para aplicar el Método de Wenner.

El principio básico es el mismo que en el caso anterior y, de hecho, las cajas cuentan con cuatro bornes que se conectan a un resistivímetro tetrapolar con la misma configuración que en el Método de Wenner.

Generalmente, las dimensiones de las cajas mantienen la relación $S[\text{cm}^2] / L[\text{cm}] = 2$, siendo S la superficie transversal de conducción y L el largo de la caja. Por lo tanto, una vez determinada la resistencia (R) que opone el volumen de suelo ensayado al flujo de corriente, su resistividad se calcula como:

$$[1.7-b] \rho[\Omega \cdot \text{cm}] = 2 R[\Omega]$$

Método de Barnes para elaboración de perfiles verticales

Según se aclarara antes, en la determinación de la resistividad de los suelos por el Método de Wenner el espaciamiento entre los electrodos enclavados en el terreno representa la profundidad de la medición; para un espaciamiento (profundidad) dada, lo que se obtiene en realidad es el valor medio de resistividad entre la superficie del terreno y una profundidad igual a dicho espaciamiento.

Ello representa una limitación del método para la elaboración de perfiles verticales de resistividad, particularmente útiles cuando se diseña un dispersor profundo de corriente de protección catódica (Capítulo 3); sin embargo, es posible calcular los valores de resistividad por capas a lo largo del espesor requerido a partir de la información obtenida por medio del Método de Wenner.

Para ello, tomaremos una serie de N medidas de resistencia ubicando los electrodos a lo largo de una línea recta que pase por el punto de interés, separándolos una distancia L/N , $2L/N$, ..., L , respectivamente, donde L representa la profundidad máxima a la cual se desea elaborar el perfil.

La medida i -ésima de resistencia (R_{1i}) puede interpretarse como equivalente paralelo de la resistencia de i capas de terreno de espesor L/N que se suceden desde la superficie hasta la profundidad iL/N . Por lo tanto, si llamamos R_i a la resistencia correspondiente a la capa i -ésima, tendremos:

$$[1.8-a] \frac{1}{R_{1i}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i}$$

lo cual suele expresarse en términos de conductancias ($G_i = 1/R_i$):

$$[1.8-b] G_{1i} = G_1 + G_2 + \dots + G_i$$

De este modo, para la capa de suelo comprendida entre las profundidades iL/N y $(i+1)L/N$ resulta:

$$[1.9-a] G_{i+1} = G_{1(i+1)} - G_{1i}$$

$$[1.9-b] \frac{1}{R_{i+1}} = \frac{1}{R_{1(i+1)}} - \frac{1}{R_{1i}}$$

De donde:

$$[1.10] R_{i+1} = R_{1i} R_{1(i+1)} / (R_{1i} - R_{1(i+1)})$$

Entonces, la resistividad media de la capa i -ésima de suelo será:

$$[1.7-c] \rho_i [\Omega \cdot \text{cm}] = 2\pi (L/N) [\text{cm}] R_{i+1} [\Omega]$$

La cantidad de lecturas y el espaciamiento dependerán de la profundidad a relevar y el espesor máximo definido de las capas de terreno; normalmente, se seleccionan de modo que éste último no sea superior a 2 o 3 metros (es decir, $L/N = 2 \dots 3 \text{ m}$) aunque siempre deberán analizarse las

variaciones del perfil y eventualmente refinar el relevamiento en las zonas de interés.

El procedimiento descrito suele repetirse para dos o más líneas rectas que se cruzan en el punto de interés (por ejemplo, el posible emplazamiento de un dispersor) a fin de obtener algo parecido a un “mapa” de resistividades para cada profundidad.

1.5 Velocidad de corrosión

Considerando nuevamente el modelo de la celda de corrosión representada en la Figura 1.1, recordemos que la pérdida de material anódico por corrosión viene acompañada por un flujo de corriente eléctrica positiva que abandona la superficie del metal (llamada *corriente de corrosión*) para ingresar al medio electrolito, acompañado de un flujo de electrones que son liberados durante la reacción anódica de oxidación y circulan a través del conductor eléctrico vinculante hasta alcanzar la región anódica, donde son consumidos por la reacción de reducción (Ecuaciones [1.1] y [1.4]) Tanto en la región anódica como en la catódica, en condiciones estacionarias se conservará una carga eléctrica neta constante.

Ello sugiere que la tasa temporal de pérdida de material anódico, también conocida como *velocidad de corrosión* vendrá dada por la intensidad de la corriente de corrosión.

En efecto, la carga eléctrica (Q_e) que se libera al medio electrolito en la región anódica por gramo de material oxidado viene dada por:

$$[1.11] Q_e = (m_{me} / M_{me}) \times n \times F$$

Donde m_{me} es la masa en gramos de material oxidado, M_{me} es el peso atómico del metal anódico, n es la cantidad de electrones que se transfieren en la reacción de oxidación y F es la *Constante de Faraday* (equivalente a la carga eléctrica representada por un mol de electrones, representada en valor absoluto: $F = 96,500$ coulomb / mole_e)

Por otra parte, la carga eléctrica positiva se transfiere por medio de la corriente de corrosión (I_c), por lo cual en condiciones de régimen estacionario se tendrá:

$$[1.12] I_c = Q_e / t \Rightarrow Q_e = I_c \times t$$

Siendo t el intervalo de tiempo a lo largo del cual se transfiere la carga Q_e . Si llamamos i a la densidad de corriente por unidad de superficie anódica (S_{an}) y combinamos [1.11] con [1.12] resulta:

$$[1.13] m_{me} / t S_{an} = i M_{me} / n F$$

La Ecuación [1.13] se conoce como *Ley de Faraday*. Su importancia radica en que permite cuantificar la masa de material anódico degradado por la corrosión, a partir de parámetros físicos medibles ya sea en forma directa o indirecta.

Si se divide el primer miembro de [1.13] por la densidad (δ_{me}) del material anódico, se obtiene la tasa o velocidad de corrosión (v) expresada en unidades de longitud por unidad de tiempo

$$[1.14] \quad v = m_{me} / \delta_{met} S_{an} = i M_{me} / \delta_{me} n F$$

En la práctica, las unidades en la Ecuación [1.14] suelen seleccionarse de modo de expresar la velocidad media de corrosión a lo largo de un período de tiempo significativo, por ejemplo un año. Para el caso de los aceros, tendremos:

$$n = 2 \text{ (Ecuación [1.1])}$$

$$\delta_{me} = 7.9 \text{ gr/cm}^3$$

$$M_{me} = 55.8 \text{ gr/mol}$$

$$F = 96,500 \text{ coulomb/mol}_e$$

Sustituyendo estos valores en [1.14] y ajustando las unidades, resulta:

$$v_{ac} = 55.8[\text{gr/mol}_{Fe}] \times i[\text{mA/cm}^2] / (7.9[\text{gr/cm}^3] \times 2[\text{mol}_e/\text{mol}_{Fe}] \times 96,500[\text{c/mol}_e])$$

$$v_{ac} = 3.66 \times 10^{-5}[\text{cm/c}] \times i[\text{mA/cm}^2] \times 31.536 \times 10^6[\text{s/año}] \times 10^{-3}[\text{A/mA}]$$

$$v_{ac} [\text{cm / año}] = 1.15 \times i[\text{mA/cm}^2]$$

$$v_{ac} = 1.15 \times i[\text{mA/cm}^2]$$

Es decir, la velocidad de corrosión en aceros será del orden de 12 mm al año por cada mA/cm² de corriente de corrosión. Este resultado también puede traducirse a términos másicos, expresando que la masa de metal degradado en el caso de aceros será de aproximadamente 10 Kg al año, por cada A de corriente de corrosión.

1.6 Formación de películas de óxido y corrosión atmosférica

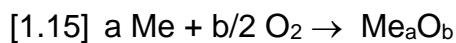
Evidentemente, el parámetro fundamental en la aplicación práctica de la Ley de Faraday es la densidad superficial de corriente de corrosión. Su medición y registro a lo largo de períodos de tiempo suficientemente prolongados revelará, en el caso de metales sometidos a un proceso espontáneo de corrosión (es decir, sin la aplicación de un sistema externo de protección anticorrosiva) una variación temporal de su valor, que puede estar asociada tanto a alteraciones de naturaleza físico-química en la interfase con el medio ambiente (desencadenadas por el propio proceso corrosivo) como a la formación y desarrollo de una capa superficial de óxido sobre la región anódica.

Bajo determinadas condiciones, la capa superficial de óxido puede proteger al metal del ulterior avance de la corrosión, actuando de cierto modo como una barrera anticorrosiva, lo cual se conoce como *pasivación por anodizado* de la superficie metálica. Esto se comprueba directamente en la Tabla 1.2, observando que para un mismo material (hierro dulce) el potencial estándar de reducción es más negativo (anódico) en ausencia de la capa superficial de herrumbre.

La pasivación de la superficie en el caso de los aceros les confiere una mayor nivel de protección contra la corrosión atmosférica que frente a otras modalidades de degradación por oxidación, tales como la formación de celdas diferenciales de corrosión. Por otra parte, la protección anticorrosiva por pasivación es mucho más efectiva en las fundiciones que en el acero y de hecho constituye un mecanismo fundamental de protección en las cañerías y estructuras de hierro fundido.

Las características de las películas superficiales de óxido dependen del metal en cuestión y de sus elementos de aleación, pudiendo ser de naturaleza porosa (Na, K, Mg) o densa (Fe, Cu, Ni), compactas o quebradizas, etc.

El espesor y la velocidad de crecimiento de esta capa determina el grado de protección que brinda el óxido al metal subyacente. La *Relación de Bedword – Pelling* (R_{BP}) permite cuantificar este parámetro para una reacción de oxidación dada. En efecto, para la oxidación de un metal genérico:



dicho parámetro se define como la relación entre el volumen de óxido generado y el volumen de metal consumido. Resulta sencillo deducir la siguiente expresión:

$$[1.16] R_{BP} = M_{ox}\delta_{me} / aM_{me}\delta_{ox}$$

Donde M [gr/mol] y δ [gr/cm³] representan respectivamente los pesos moleculares y las densidades del óxido y del metal de origen.

En función del valor que tome R_{BP} para cada metal en particular, se distinguen tres casos posibles de ataque superficial por corrosión atmosférica, de acuerdo a las propiedades de la película de óxido formada [10]:

1. $R_{BP} < 1$: Óxido poroso y no protector. En este caso, se produce un ataque directo en la superficie metálica con una velocidad de corrosión casi constante:

$$[1.17-a] \quad v_{ac} = dx/dt = C \text{ (cte.)} \Rightarrow x = K_1 t + K_2$$

Siendo x el espesor de la película de óxido en el instante t .

2. $R_{BP} \approx 1$: Óxido no poroso, formación de una película protectora. La transferencia de iones y electrones a través de la misma se produce por difusión iónica (según la *Ley de Fick*) y conducción eléctrica respectivamente, y la velocidad de corrosión obedece a una ecuación de tipo parabólico:

$$[1.17-b] \quad v_{ac} = dx/dt = C/x \Rightarrow x^2 = K_1 t + K_2$$

Si la conductividad eléctrica del óxido es muy baja (película muy protectora) se tendrá una ecuación de tipo logarítmico para la velocidad de corrosión:

$$[1.17-c] \quad v_{ac} = dx/dt = C/t \Rightarrow x = K_1 \log(K_2 t + K_3)$$

3. $R_{BP} >> 1$: Película de óxido sometida a tensiones de compresión, probable tendencia a astillarse y desprenderse.

Para el hierro, $R_{BP} = 2.06$, por lo cual se encuadra en el caso (2) desde el punto de vista de la velocidad de corrosión (ley parabólica) aunque la película de óxido que forma presenta las características mencionadas para el caso (3), es decir, se trata de un óxido no muy adherente, que tiende a desprenderse fácilmente provocando un incremento en la tasa de corrosión.

La naturaleza frágil de esta película, unida al hecho de que es catódico con respecto al metal de origen, resulta de gran importancia puesto que constituye el fundamento de uno de los mecanismos más comunes de corrosión en aceros, tal como se analizará en la Sección 1.7.1.

La estructura de la película de óxido de hierro consta de tres capas bien diferenciadas, a saber:

- Una capa externa relativamente delgada, con mayor proporción de oxígeno, consistente en óxido férrico (Fe_2O_3)
- Una capa intermedia, relativamente gruesa, compuesta de óxido ferroso-férrico (Fe_3O_4)

- Una capa interna más compacta, adyacente a la superficie de hierro inalterado y con mayor proporción de este elemento, correspondiendo aproximadamente a óxido ferroso (FeO)

Su remoción puede realizarse tanto por medios químicos como mecánicos y en general ello es imprescindible como operación preliminar a la aplicación efectiva de cualquier tipo de revestimiento anticorrosivo en cañerías enterradas o sumergidas, según se verá en el Capítulo 2. Las técnicas de aplicación para estos casos se basan normalmente en el decapado mecánico por medio de abrasión, arenado, granallado, cepillado, etc.

1.7 Mecanismos de corrosión en cañerías metálicas [2]

Un desarrollo más profundo de la teoría de Nernst (más allá del alcance de las presentes notas introductorias al tema) permitiría demostrar que la corrosión de un metal sumergido en un medio electrolito puede producirse como consecuencia de cualquiera de los siguientes mecanismos físico-químicos, actuando aisladamente o combinados:

- Heterogeneidad de la superficie metálica
- Heterogeneidad del electrolito
- Contacto de metales diferentes
- Influencia de un campo eléctrico externo
- Acción bioquímica

En todos los casos, existe una circulación de electricidad continua con formación de regiones anódicas y catódicas. La corrosión (descomposición y pérdida de material) afectará exclusivamente al metal anódico de la pareja y la violencia del ataque dependerá tanto de la naturaleza de los metales que intervienen en el proceso como de las características del medio electrolito. La evolución del fenómeno depende también de los productos de corrosión formados.

A continuación, examinaremos más detalladamente cada uno de los mecanismos de corrosión mencionados.

1.7.1 Heterogeneidad de la superficie metálica

Es el caso, por ejemplo, de una costra de herrumbre que se rompe y/o desprende parcialmente de la superficie (Figura 1.4) bajo el efecto de una acción mecánica cualquiera: el óxido es catódico con respecto al hierro

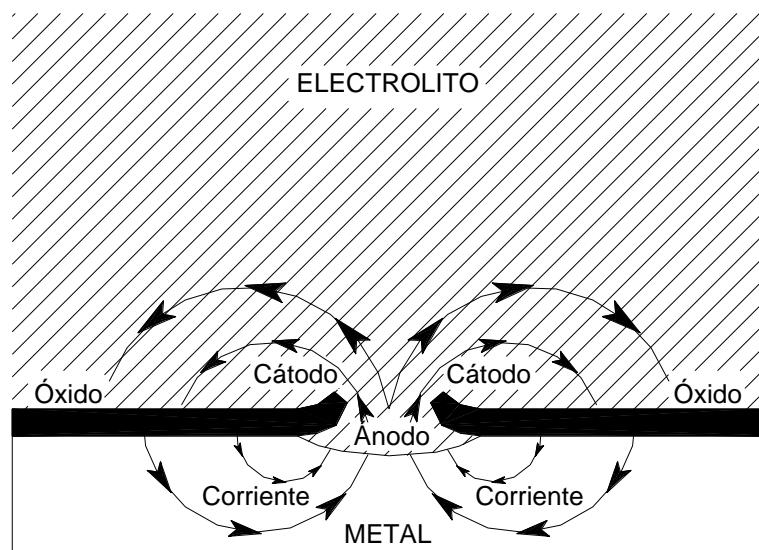


Figura 1.4: Corrosión localizada por desprendimiento de la capa superficial de óxido

También puede presentarse cuando en el curso de una reparación se sustituye una sección dañada de cañería por un tramo nuevo; en este caso, es común que el metal pre-existente cuente con una capa de óxido protector de la que carecerá, generalmente, el tramo sustitutivo.

Otro ejemplo lo constituye la solidificación instantánea de un metal en fusión al contacto con una pared fría (típicamente durante un trabajo de soldadura) fenómeno que puede provocar una heterogeneidad de estructura.

La corrosión será tanto más acelerada en la región anódica cuanto más rico sea el electrolito en aniones (SO_4^2- , Cl^- , etc.) y los productos de corrosión solubles; sin embargo, puede ocurrir que también se originen productos de corrosión (sales insolubles por ejemplo) que se opongan a la progresión del fenómeno. La corrosión es entonces superficial y se detiene por sí misma.

1.7.2 Heterogeneidad del electrolito

Diferencias en la concentración de sales o gases disueltos son suficientes para provocar corrientes de corrosión asociadas a celdas diferenciales. El oxígeno sobre todo, del cual depende en gran parte la intensidad de la corriente, origina regiones catódicas allí donde se ha concentrado, correspondiendo las regiones anódicas a las zonas menos oxigenadas (aireación diferencial). Tales fenómenos pueden ser tanto localizados como generalizados, abarcando grandes extensiones o superficies

Ocurre frecuentemente que las cañerías metálicas atraviesen terrenos de naturaleza química o física diferente: calcáreos, arenas, agua dulce, agua salada, es decir medios electrolitos diferentes (ver Figura 1.5). Se forman entonces pilas de concentración diferencial cuyo circuito exterior está formado por la propia cañería, con regiones anódicas (potencialmente sometidas a corrosión) en aquellas zonas donde se verifica:

- Mayor concentración de sales en solución: terrenos salinos, presencia de contaminación por metales, etc.
- Mayor contenido de humedad: zonas bajas anegables o pantanosas, napas freáticas, cruce de cursos fluviales.
- Mayor compactación del terreno: Cruce con caminos, rutas y vías férreas, zonas con compactación preferencial durante la construcción de la línea.
- Menor contenido de oxígeno (aireación deficiente): Cañerías instaladas bajo pavimento, terrenos impermeables o de baja porosidad (limos finos, arcillas, mantos rocosos compactos, etc.), variaciones importantes y abruptas en la profundidad o material de tapada de la cañería, tramos revestidos en concreto o con otros tipo de protección externa diferenciada del resto de la cañería.

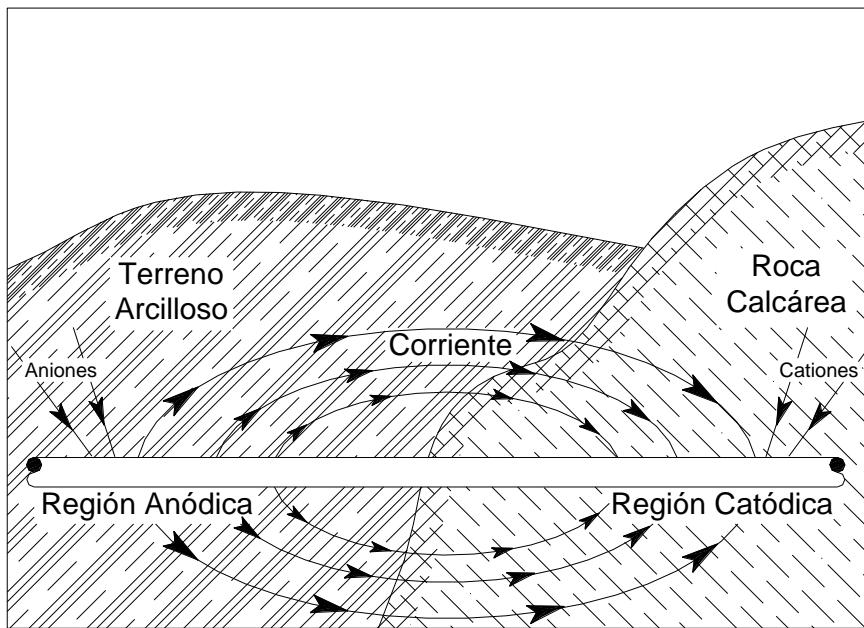


Figura 1.5: Celda de corrosión diferencial asociada a discontinuidades en la naturaleza del terreno

En general, las zonas de mayor criticidad a lo largo de la traza de una cañería enterrada serán las de transición entre terrenos o condiciones de instalación disímiles, puesto que allí se encontrarán más próximas las regiones anódica y catódica de la estructura; por ejemplo:

- Ingreso de la cañería a zonas urbanas.
- Cruces especiales, realizados por medio de tunelado, perforación dirigida, entubado, etc.
- Acometidas costeras.
- Extremos de secciones contrapesadas y otras discontinuidades externas (pasajes a través de muros de mampostería, encofrados en concreto, ingreso a instalaciones de superficie, etc.)
- Tramos de cañería cuyo material de tapada haya sido recientemente removido durante tareas de reparación o mantenimiento.

1.7.3 Contacto de metales diferentes

Cuando dos metales disímiles se encuentran en contacto entre sí e inmersos en el seno de un medio electrolito, se genera la clásica pila electroquímica estudiada en todos los manuales de química. El metal más noble, según la escala de potenciales de Nernst, se comportará como cátodo de la celda, mientras que el restante asumirá el rol de “ánodo de sacrificio”, sometido a la acción corrosiva y consecuente degradación. Este mecanismo de corrosión se conoce comúnmente como “corrosión anódica”

En el caso de la Figura 1.6, la corriente eléctrica positiva circula a través del electrolito desde zinc hacia el cobre, cerrándose el circuito por el contacto entre los dos metales. La corriente será tanto más intensa cuanto mayor sea la diferencia entre los potenciales de reducción de cada metal.

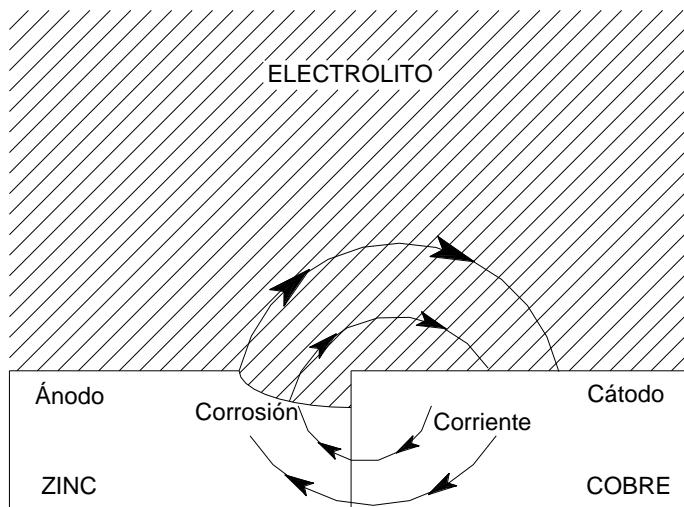


Figura 1.6: Corrosión anódica por contacto entre metales disímiles

1.7.4 Influencia de campos eléctricos externos

Este es el caso estudiado en la electrólisis de las soluciones. Tal eventualidad se presenta en la práctica cuando existen corrientes continuas de retorno y/o de fuga circulando a través del terreno (también llamadas “corrientes vagabundas”) provenientes de diversas instalaciones o estructuras electrificadas, tales como:

- Otras estructuras metálicas subterráneas provistas de sus propios sistemas de protección catódica.
- Sistemas de tracción: líneas de tranvía y ferrocarriles, trolley-buses, subterráneos.
- Instalaciones de galvanoplastia y electroquímica: cubas de cromado o niquelado, procesos de electrólisis, decapado y limpieza química, anodizado, etc.
- Líneas de transporte y distribución de energía eléctrica en corriente continua.
- Instalaciones industriales y particulares defectuosas, sistemas de puesta a tierra de equipos de potencia, conductores de bajada y puesta a tierra de pararrayos.

También existen corrientes telúricas o de origen geomagnético de magnitud y características variables (tanto geográfica como temporalmente) que eventualmente pueden interferir con las canalizaciones metálicas subterráneas y su sistema de protección anticorrosiva.

La intensidad de las corrientes vagabundas que circulan a lo largo de las instalaciones metálicas enterradas puede ser del orden de varias centenas de amperios, particularmente en las proximidades de líneas viales electrificadas defectuosas.

Tal como se exemplifica en la Figura 1.7, la interferencia suele originarse como consecuencia del retorno de corrientes de fuga o descargas a tierra a través del terreno y las estructuras metálicas que se encuentran en él (las cuales ofrecen un camino de mínima resistencia para el flujo de corriente). En los puntos donde la corriente eléctrica abandona estas estructuras para reingresar al medio, el metal sufre un proceso de corrosión por electrólisis; a partir de la Ley de Faraday (Ecuación [1.13]) es posible estimar teóricamente el peso del metal electrolizado.

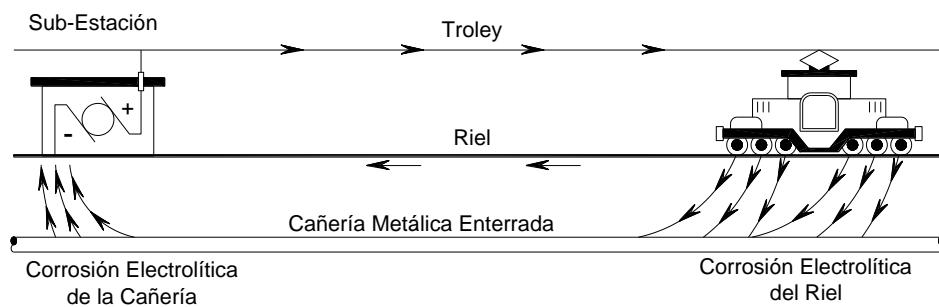


Figura 1.7: Corrosión provocada por la fuga y retorno de corriente desde un sistema de rieles electrificados

Desde el punto de vista de las características del terreno, puede decirse que generalmente los rellenos elevados, pedregosos o rocosos, así como las regiones secas y áridas se prestan menos a la circulación de corrientes vagabundas que las excavaciones profundas, los túneles y las regiones pantanosas.

Por su parte, las corrientes alternas representan un riesgo de naturaleza diferente; las experiencias realizadas parecen indicar que, aunque igualmente corroen, su acción es considerablemente menor con respecto a las corrientes continuas. Sin embargo, el tema es aún motivo de controversia y existe actualmente un renovado interés por la temática, impulsado en parte por la creciente utilización de franjas de servidumbre compartidas entre cañerías metálicas enterradas y líneas aéreas de transporte de energía eléctrica en alta tensión (consultar Refs. [14] a [19]). Más aún, es un hecho comprobado que ciertos suelos actúan como células rectificadoras y aumentan así los riesgos de corrosión asociado a las corrientes alternas.

Las fuentes más comunes que explican la presencia de corrientes alternas en el terreno son:

- Inducción electromagnética desde instalaciones de potencia (estaciones de generación y/o transformación eléctrica) o sistemas de transporte en alta tensión (líneas aéreas o subterráneas)

- Fugas de corriente desde instalaciones de puesta tierra (jabalinas, mallas de protección, descargadores, etc.) en instalaciones industriales y estaciones de transformación.
- Corrientes de falla asociadas a la caída de cables aéreos o líneas subterráneas deterioradas en las proximidades de la traza de las cañerías, particularmente en el caso de franjas de servidumbre compartidas y zonas urbanas con alta densidad de servicios enterrados.

Adicionalmente a la problemática que implica la existencia de campos eléctricos desde el punto de vista de la corrosión en estructuras de acero, no resulta menor la importancia que reviste desde el punto de vista de la seguridad personal de los operarios que trabajan en contacto con dichas estructuras (consultar Refs. [14] y [17]) Tampoco deben ignorarse las dificultades originadas por la interferencia e introducción de ruido electromagnético en sistemas auxiliares de supervisión y control (por ejemplo, equipos de telecomando y transmisión de datos, caudalímetros, unidades correctoras y computadores de flujo, PLCs, rectificadores, etc.) lo cual obliga muchas veces a implementar medidas de mitigación y monitoreo especiales (consultar Ref. [19])

1.7.5 Acción bioquímica

Algunas especies de bacterias aerobias y anaerobias viven en los suelos húmedos o en aguas generalmente ricas en hidróxidos de hierro u otros metales. Hay algas que se desarrollan fácilmente en las aguas estancadas (pantanos) e incluso en las aguas quietas de los estanques y depósitos. Cuando son aéreas, su acción despolarizante debida al oxígeno que desprenden por fotosíntesis o por quimio-síntesis así como a las variaciones de pH que provocan, pueden determinar la corrosión de las paredes a las cuales se adhieren.

Adheridas a las paredes internas o externas de las cañerías y favorecidas por la formación de “fouling”, costras o depósitos de material granular fino sobre la superficie metálica, ciertas ferrobacterias (*Crenothrix*, *Leptothrix*, etc.) forman a menudo (y muy rápidamente), colonias que toman el aspecto de tubérculos, provistos de un caparazón duro proveniente del hidrato ferroso soluble que se transforma en sesquióxido de hierro insoluble. Cuando se arranca el tubérculo, se observa siempre que el lugar en el que estaba ubicado presenta un debilitamiento de la pared del conducto.

En estos casos, la acción bacteriana se combina con la formación de una celda de aireación diferencial asociada a la película o costra en la que se desarrolla e integra la colonia biológica.

Cuando la estructura en cuestión cuenta con un sistema de protección catódica, la actividad metabólica de estos organismos se traduce, a menudo, en la despolarización [9] de la superficie metálica y la consiguiente eliminación de la protección anticorrosiva que dicho sistema le confiere a la estructura; de hecho, la presencia de sales de hierro en solución (catiónica) activa aún más la

corrosión microbiológica, si los restantes parámetros del medio hacen viable su desarrollo. De este modo, las bacterias que encuentran en estos puntos las condiciones requeridas para proliferar, activan por su acción despolarizante la agresividad del ambiente.

En particular, ciertas sulfobacterias anaerobias, tales como el *Vibrio Desulfuricans*, reducen los sulfatos y liberan ácido sulfídrico (H_2S), un gas sumamente corrosivo. El olor a gas y la presencia del sulfuro de hierro en el medio identifican a menudo este fenómeno. Otras bacterias (*Thibacillus*, *Thioxydans*) oxidan el azufre elemental dando lugar a una formación de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Son precisamente estas bacterias sulfato-reductoras las que con mayor frecuencia originan corrosión microbiológica en oleoductos y gasoductos de acero (consultar Ref. [4]).

La actividad metabólica de dichas bacterias consume el hidrógeno molecular H_2 de la película protectora que se desarrolla como consecuencia de la polarización ambiental de la superficie metálica [9], la cual queda entonces sometida a la acción corrosiva del ambiente en la cual está inmersa.

En la práctica, la presencia de sulfatobacterias y la existencia de las condiciones adecuadas para su desarrollo pueden determinarse anticipadamente mediante una análisis químico del suelo o lecho en el cual se instalará la estructura metálica. En caso de verificarse o sospecharse esta problemática, deberán tomarse las precauciones del caso durante la etapa de diseño de la cañería (definición de la traza, material de tapada, revestimiento anticorrosivo, etc.) y del sistema de protección catódica (niveles mínimos de polarización requeridos para contrarrestar la despolarización inducida por la actividad bacteriana)

Cuando se sospeche la presencia de corrosión bacteriana en cañerías que se encuentran en servicio, puede procederse a descubrir el tramo en cuestión a fin de inspeccionar directamente su superficie. La actividad microbiológica se evidenciará por la presencia de una película negra de sulfuro de hierro que cubre la superficie de la cañería en aquellos puntos donde el revestimiento anticorrosivo se encuentra dañado. La naturaleza química de dicha película puede verificarse rápidamente in-situ mediante la aplicación de una solución diluida de ácido clórico, que reaccionará en presencia de sulfuro de hierro liberando sulfuro de hidrógeno gaseoso, inmediatamente reconocible por su olor característico a huevo podrido.

1.7.6 Otros mecanismos de corrosión

Existen numerosos mecanismos de corrosión, aparte de los referidos en las secciones anteriores, que pueden afectar a las estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Sin embargo, en el presente trabajo haremos tan sólo una muy breve mención de las mismas dado que desde un punto de vista estadístico su incidencia es menor (aunque no necesariamente despreciable) en la ocurrencia de fallas por corrosión en cañerías de transporte y distribución de gas natural tratado, dulce y seco (es decir, con contenidos

muy reducidos de humedad, anhídrido carbónico, anhídrido sulfuroso, sulfuro de hidrógeno y otros compuestos de azufre)

- *Corrosión Interna:* Normalmente, el ataque por corrosión en gasoductos de transporte y distribución afecta exclusivamente a la superficie externa de las cañerías. Pueden darse excepciones puntuales por ejemplo cuando la acumulación de agua en los puntos más bajos de la línea, en combinación con gas no tratado o fuera de especificación (contenido significativo de CO₂ o H₂S) provoca la aparición de zonas con corrosión interna localizada. Por el contrario, la corrosión interna sí constituye una problemática relevante en el caso de oleoductos y cañerías de producción ("gathering lines") que transportan fluidos potencialmente agresivos en forma previa a su tratamiento. Los métodos de control y mitigación de la corrosión interna difieren sustancialmente de las tratadas en el presente trabajo, siendo específicas al tipo de instalación y fluido de trabajo. En términos generales, pueden basarse en la aplicación de revestimientos internos anticorrosivos, inhibidores químicos, instalación de sifones, purgas y monitoreo de los puntos especialmente susceptibles por medio de sondas estratégicamente ubicadas para detectar acumulación de líquidos (en el caso de cañerías de gas) y/o corrientes de corrosión. También existen sistemas especiales de protección catódica especialmente diseñados para la protección interna de cañerías, válvulas y recipientes.
- *Corrosión Bajo Tensión* ("Stress Corrosion Cracking" o "SCC"): Se trata de un mecanismo combinado de corrosión y fractura por fragilización de un material normalmente dúctil, desencadenado bajo la acción de esfuerzos de tensión aplicados durante períodos suficientemente prolongados y en presencia de un medio ambiente de características específicas al material en cuestión. Es una causa importante de fallas en aceros inoxidables austeníticos en ambientes con presencia de cloruros. Las tensiones pueden ser de origen externo (solicitudes mecánicas, esfuerzos térmicos, etc.) o interno, tales como esfuerzos residuales de los procesos de trabajo en frío a los que haya sido sometida la pieza en cuestión durante su manufactura. Ref. [20]
- *Corrosión Intergranular:* Mecanismo de corrosión provocado por diferencias de potencial entre las fronteras de grano y el resto de la aleación, generalmente vinculado a la precipitación de una fase desde una solución sólida.
- *Corrosión Interdendrítica:* Mecanismo de corrosión típico en fundiciones, que se caracteriza por un ataque selectivo que avanza por trayectorias preferenciales entre las dendritas.
- *Daños por Hidrógeno:* Agrupamos aquí diversos fenómenos de degradación de las propiedades mecánicas de un material dado, cuyo común denominador es la presencia de hidrógeno (ya sea en estado gaseoso o atómico) en cantidades tales como para desencadenar dichos fenómenos. El origen de este elemento puede hallarse en el propio producto transportado o almacenado, pero también puede ser el resultado de una

contaminación durante alguna etapa del proceso de manufactura (fundición, laminado, soldadura, etc.) o incluso de una operación incorrecta de los sistemas de protección catódica por corriente impresa (Ver Nota Aclaratoria [9] y Capítulo 3; ya ha sido mencionado el deterioro ocasionado en ciertos tipos de revestimiento anticorrosivo – despegue catódico - como consecuencia de la sobreprotección catódica de una estructura metálica y la formación de burbujas de H₂ en la interfase metal-revestimiento) Otros mecanismos de afectación (particularmente daños en los tubos y superficies húmedas de los generadores de vapor de alta presión) implican la difusión de hidrógeno en la estructura cristalina del acero, reaccionando con el carbono para formar metano gaseoso (CH₄) el cual provoca esfuerzos locales muy elevados, fisuración intergranular (*"Hydrogen-Induced Cracking"*), formación de cavidades sub-superficiales (*"Hydrogen Blistering"*) descarburación y fragilización del metal. En el caso específico de los gasoductos y otros tipos de cañerías de alta presión, resulta de interés mencionar la formación de grietas o fisuras por efecto de tensiones en presencia de hidrógeno (*"Hydrogen Stress Cracking"* o *"HSC"* – Ref. [21]) por cuanto se trata de un fenómeno que ha sido reconocido desde mediados de la década de los 60' como causa de algunos fallos catastróficos, afectando particularmente a las cañerías y recipientes bajo presión fabricadas en aceros aleados de alta resistencia (X-70 y superiores) [11] Actualmente, la temática es motivo de investigación teórica y aplicada, impulsada por el creciente empleo de dichos aceros a fin de satisfacer las crecientes presiones de diseño en instalaciones modernas.

- Por último, debemos recordar que existen otros mecanismos de corrosión que aparecen vinculados con diversos fenómenos de tipo dinámico, tales como fatiga, cavitación, turbulencia, erosión abrasiva, etc., cuyo estudio y comprensión (amén de ser complejo y, en muchos casos, sólo parcial) rebasa el alcance de este trabajo introductorio.

1.8 Morfología de la corrosión

Sin pretender abundar en un tema que sería propio de un curso de defectología, es importante destacar que el aspecto visual bajo el cual se manifestará un fenómeno de corrosión externa puede ser muy variable, aún limitándonos al caso de estructuras de acero enterradas o sumergidas. En todo caso, el análisis de su morfología es de gran significación al momento de evaluar la severidad y criticidad del daño, así como su origen y probable evolución futura.

Resulta particularmente interesante señalar que la mayoría de los criterios de clasificación de daños por corrosión incorporan, de un modo u otro, su caracterización morfológica previa supuesta como dato de partida. En las cañerías y recipientes operados a presión existen, como veremos a continuación, algunas formas bien definidas de ataque corrosivo que revisten gran importancia por su potencial para desencadenar fallas catastróficas en períodos de tiempo notablemente reducidos.

Por último, la familiarización con la terminología de uso en manuales, estándares y bibliografía especializada constituye un conocimiento imprescindible para los técnicos y profesionales vinculados al tema.

Es por ello que en esta sección incluimos un breve glosario complementado con algunas definiciones y conceptos básicos, que el lector podrá complementar recurriendo al Apéndice A de la Ref. [1]

- **Corrosión Generalizada o Uniforme:** Forma de corrosión que provoca una disminución relativamente homogénea de espesor en toda el área afectada.
Ejemplos típicos: corrosión superficial por acción atmosférica o marina, despegue catódico del revestimiento anticorrosivo u otras formas de apantallamiento de la corriente de protección catódica (Capítulo 3)
- **Corrosión Localizada:** Por contraposición con la anterior, forma de corrosión concentrada en una región de pequeñas dimensiones y que a menudo provoca una pérdida de material con adelgazamiento importante relativo a las zonas adyacentes, por lo cual puede actuar eventualmente como un concentrador de tensiones, dependiendo de sus dimensiones específicas.
Ejemplos típicos: corrosión asociada a la formación de celdas galvánicas, procesos electrolíticos, pérdida o deterioro localizado del revestimiento anticorrosivo, ataques selectivos, actividad bacteriana, etc. Figuras 1.10 a 1.13.
- **Picadura (“Pitting”):** Forma de corrosión localizada que se caracteriza por la formación de cavidades profundas y de diámetro muy pequeño (de dimensión milimétrica o inferior) Su origen se encuentra vinculado a una marcada desproporción entre la zona anódica y catódica, lo cual implica que la densidad superficial de corriente de corrosión alcance valores muy elevados. De acuerdo con la Ley de Faraday (Ecuaciones [1.13] y [1.14]) la velocidad de corrosión asociada a la formación de pitting puede ser muy

alta, provocando la rápida perforación de la cañería; de hecho, este tipo de corrosión es uno de los más graves que pueden presentarse en la práctica pues sus efectos son potencialmente muy graves y acelerados.

Ejemplos típicos: en el caso de cañería enterradas, suele ocurrir en aquellos puntos donde la traza cruza una veta de material agresivo (es decir, de muy baja resistividad en comparación con el resto del terreno), o bien, en zonas donde se produce estancamiento de líquidos en contacto con la superficie metálica. Otros posibles mecanismos de formación de pitting (bajo ciertas condiciones) son: ataque por CO₂, daños en el revestimiento anticorrosivo y ciertos tipos de ataque bacteriano. Figuras 1.8 y 1.9.

- *Corrosión Selectiva:* Corrosión localizada con ataque selectivo en un componente o fase específica de una aleación o material polifásico, a menudo como consecuencia de la formación de un par galvánico con alguna de las restantes fases. Figura 1.13
- *Corrosión por grieta o cavidad (“Crevice Corrosión”):* Forma de corrosión localizada provocada por la concentración de sales disueltas, iones metálicos, oxígeno u otros gases o especies químicas, en grietas, hendiduras o cavidades apartadas del flujo principal de fluido, o debajo de un objeto que impide el contacto pleno de la superficie metálica con el medio electrolito, resultando en la formación de celdas diferenciales de corrosión.
- *Corrosión Laminar (o “Exfoliación”):* Corrosión localizada y sub-superficial, que se desarrolla en zonas paralelas a la superficie metálica y resulta en la formación de láminas muy delgadas de material inalterado.
- *Corrosión Filiforme:* Forma de corrosión que se desarrolla por debajo de un revestimiento externo y toma la apariencia de filamentos aleatoriamente distribuidos sobre la superficie metálica.
- *Corrosión Tuberculár:* Formación de depósitos o acumulaciones localizadas de productos de corrosión bajo la forma de protuberancias llamadas tubérculos diseminadas sobre la superficie afectada.

Si bien la clasificación expuesta resulta de gran utilidad, en particular porque ayuda a sistematizar el estudio y tratamiento de la corrosión, en la práctica se requiere a menudo de gran experiencia para reconocer a partir del simple análisis visual de una zona afectada cuál es el mecanismo y tipo de corrosión dominante, así como realizar una evaluación correcta de su severidad.

A ello contribuye el hecho de que en la práctica se encuentran a menudo formas combinadas de corrosión (por ejemplo, zonas de corrosión generalizada con pequeñas áreas afectadas de pitting y depresiones localizadas de tamaño regular donde la pérdida de espesor es significativa – Figuras 1.8 y 1.9), a veces agravadas por la presencia de daños mecánicos que tal vez hayan propiciado el inicio de la corrosión (Figura 1.11).

En tales casos, es imprescindible realizar una evaluación integrada del defecto, incorporando la acción de todas las formas de daño presentes o identificando aquella que resulta crítica para la integridad estructural de la cañería, como paso previo a su *categorización* (o “*sentencia*”) e implementación de las medidas correctivas que correspondan, de acuerdo a los estándares y procedimientos de aplicación. Consultese, por ejemplo, la Ref. [22]

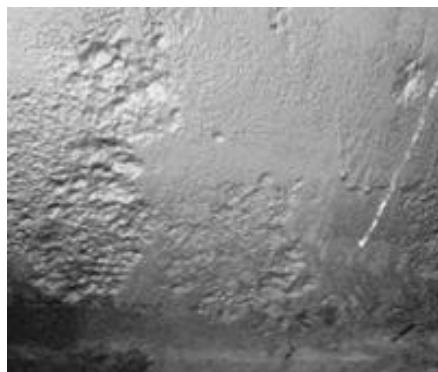


Figura 1.8: Corrosión generalizada con zonas localmente atacadas y pitting.

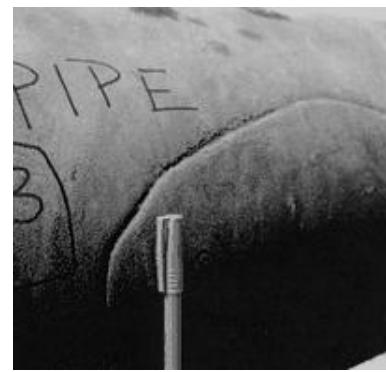


Figura 1.11: Corrosión localizada sobre daño mecánico

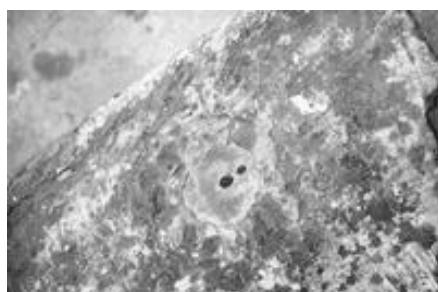


Figura 1.9: Corrosión generalizada con perforación por pitting.



Figura 1.12: Corrosión localizada por acción bacteriana (MIC)

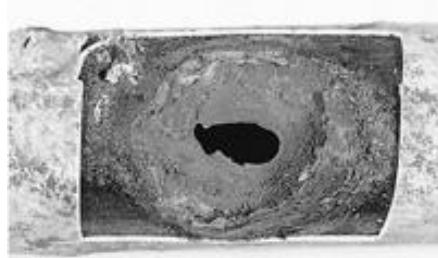


Figura 1.10: Corrosión localizada con perforación por descarga desde la cañería de corrientes vagabundas.

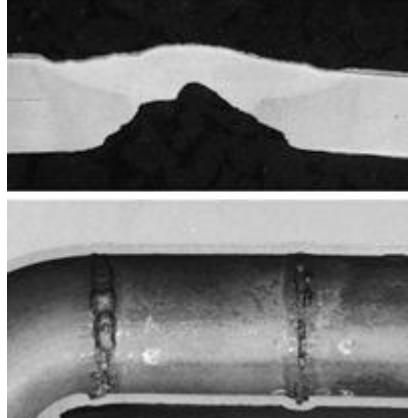


Figura 1.13: Corrosión selectiva en el material de aporte de una soldadura circunferencial.

2 Pinturas y Revestimientos Anticorrosivos

2.1 Consideraciones generales

En el capítulo anterior se han mencionado brevemente las posibles alternativas para proteger estructuras metálicas enterradas, mediante la aplicación de *sistemas activos de protección catódica*. En el Capítulo 3 analizaremos en detalle estas técnicas.

Por ahora, es importante destacar que, si bien sería teóricamente factible proteger catódicamente una estructura metálica desnuda (es decir, sin revestimiento protector alguno), los costos de instalación y mantenimiento implicados serían extraordinariamente elevados, en función del consumo requerido de energía y material anódico de sacrificio.

En el otro extremo, de lograrse una cobertura anticorrosiva perfecta (es decir, exenta de cualquier imperfección y con una resistividad eléctrica infinita) la corrosión no ocurriría, pues no habría posibilidad de que la corriente anódica abandonase la superficie del metal: la estructura estaría absolutamente aislada de su entorno, sin posibilidad de interactuar con el medio ambiente; de acuerdo a la definición introducida en la Sección 1.1, el fenómeno corrosivo no podría darse.

Sin embargo, en la práctica no es posible asumir que los revestimientos anticorrosivos son perfectos, sino que por el contrario están sujetos a fallas e imperfecciones; tampoco proveen una aislación eléctrica perfecta, si bien desde el punto de vista de la calidad del revestimiento (particularmente cuando nos referimos a los productos de más reciente desarrollo) este factor resulta absolutamente insignificante en comparación con las pérdidas de corriente provocadas por las discontinuidades (*holidays*) o roturas que todo revestimiento sufre durante el proceso de aplicación e instalación de la cañería. Ello se ve agravado a lo largo de su vida útil como consecuencia del proceso de degradación que inevitablemente provoca la acción del medio ambiente.

Cualquier avance tecnológico en este sentido (y los ha habido realmente extraordinarios en el campo de los revestimientos sintéticos) redundará en una mayor resistencia mecánica, estabilidad, aislación y facilidad de aplicación, pero seguramente no eliminará por completo este tipo de limitaciones.

Es precisamente para asegurar la protección anticorrosiva de aquellas zonas del revestimiento que por una u otra razón presentan fallas, que se utiliza la protección catódica como complemento. Es decir, ambas técnicas de protección (aislación por recubrimiento o *pasiva* y catódica o *activa*) se complementan y guardan estrecha relación al punto de ser mutuamente imprescindibles.

En efecto, resulta prácticamente imposible la aplicación efectiva de protección catódica sin la existencia de un revestimiento aislante, dado lo costoso que ello resultaría, pero tampoco es razonable pretender una

protección segura y efectiva basada exclusivamente en el revestimiento, habida cuenta de sus inevitables imperfecciones.

Este concepto de *complementación* es extraordinariamente importante, dado que constituye la base fundamental para el diseño y operación de cualquier sistema moderno de protección anticorrosiva en estructuras metálicas enterradas o sumergidas. Podemos resumirlo en la siguiente “fórmula”:

$$\text{Protección Anticorrosiva} = \text{Revestimiento Aislante} + \text{Protección Catódica}$$

Cuanta mayor sea la calidad del revestimiento (continuidad, resistencia eléctrica, química y mecánica) mayor será la eficiencia global del sistema de protección anticorrosiva, ya que el alcance de la protección catódica será superior y los consumos de corriente más reducidos.

Por otra parte, si bien el costo de la energía consumida por un sistema protección catódica no representa un porcentaje significativo del valor total de la instalación que protege, el costo de equipos y materiales de protección catódica sí es elevado. De allí la conveniencia de emplear revestimientos de buena calidad, como forma de abaratar los costos de instalación y mantenimiento de los sistemas de protección catódica: menos equipos y de menor capacidad.

En realidad, una vez definido el tipo de cobertura a emplear en una cañería enterrada o sumergida, la diferencia de costos que pueda existir entre un revestimiento de buena calidad y uno defectuoso es, en términos relativos, prácticamente insignificante.

En ambos casos se emplearán materiales que invariablemente deberán cumplir con las especificaciones adoptadas por el cliente, lo cual significa que no se puede aducir una diferencia de costos que justifique la calidad. Dichas especificaciones establecerán asimismo los espesores de los distintos tipos de revestimientos, espesores que habrán sido seleccionados por el proyectista para garantizar una adecuada aislación de la estructura y también deben ser respetados en uno u otro caso.

Por lo tanto, las diferencias de calidad en el revestimiento de cañerías quedan limitadas a la mala disposición de los elementos que componen el revestimiento y, particularmente, a técnicas de aplicación inadecuadas. La calidad final obtenida en el revestimiento anticorrosivo depende casi íntegramente de lo bien que haya sido aplicado. Ello se asocia directamente con la voluntad e idoneidad del personal afectado a las tareas de aplicación del revestimiento, control de calidad e inspección durante cada una de las etapas del proceso.

- Aplicación del revestimiento en planta.
- Pruebas de integridad y ensayos de aptitud: control de espesores, tiempo de curado, detección de poros e imperfecciones (“*holiday detection*”^[15]) adherencia, despegue catódico, resistencia a la penetración, resistencia de corte, resistencia a la abrasión, a la acción de contaminantes químicos, etc.

- Manipulación y almacenamiento de las cañerías revestidas
- Protección del revestimiento durante el transporte, desfile y soldadura de los caños en el terreno.
- Control del fondo de zanja y material de tapada: presencia de piedras u objetos agudos, contaminantes en el suelo, apoyo de la cañería, contacto o proximidad con otras estructuras enterradas, etc.
- Supervisión del revestimiento en campo de juntas soldadas:
 - _Control de los parámetros de aplicación: limpieza de la superficie, precalentamiento, temperatura y humedad ambiente, tiempos de aplicación y curado.
 - _Realización de ensayos de adherencia.
 - _Medición de espesores.
- Control y calibración periódica de todos los instrumentos de inspección.
- Supervisión de las operaciones de bajada y tapada de la cañería, incluyendo la realización de una inspección holiday integral, en forma simultánea a la bajada o con la cañería ya depositada en la zanja.
- Control y re-inspección de todas las reparaciones efectuadas en el revestimiento.
- Ensayos de integridad del revestimiento posteriores a la tapada de la cañería: envíos de corriente y ensayos de Pearson [16]

La coordinación y supervisión de todas estas actividades la realiza, normalmente, el *Inspector Principal de Obra*, quien trabaja al frente de un equipo de inspectores calificados para supervisar las distintas tareas específicas. Sobre él recae la responsabilidad de los trabajos aceptados o aprobados, por ello se requiere de él un perfecto conocimiento de la materia y sobre todo un criterio apto para adoptar soluciones “sobre la marcha” o emitir sugerencias tendientes a solucionar inconvenientes e imprevistos, con miras a la obtención del índice de calidad ideal.

Las actividades de inspección y control de calidad tienden a garantizar que en instalaciones nuevas la existencia de un revestimiento defectuoso sea fácilmente detectada en forma previa a la aplicación del sistema complementario de protección catódica.

Para ello, es de particular utilidad la realización de los ya mencionados ensayos de integridad del revestimiento, de los cuales el más común y sencillo de implementar es el de verificación de la aislación de la cañería por medio envíos de corriente.

Su aplicación es particularmente recomendable en aquellos tramos de la cañería que hayan sido sometidos a esfuerzos mecánicos significativos durante su instalación luego de la realización del último control holiday como ser cruces de ríos o rutas, tramos instalados por técnicas de tunelado o perforación dirigida y sectores donde las características agresivas del terreno supongan un riesgo para la integridad del revestimiento.

Este estudio se basa en la determinación de la cantidad de corriente necesaria para proteger las áreas expuestas de las cañerías enterradas o sea, las imperfecciones o roturas del revestimiento (que, como sabemos, siempre estarán presentes en mayor o menor medida)

Para ello, en un punto determinado de la instalación se aplica una corriente continua de magnitud conocida y en base a una serie de mediciones del potencial que asume la cañería con respecto al terreno, se determina el alcance de dicha corriente y las pérdidas ocurridas a través del revestimiento a lo largo del tramo ensayado.

Los valores límite de corriente y potencial para la aceptación del ensayo deben estar perfectamente especificados en el procedimiento correspondiente, y dependerán de las características del revestimiento, las dimensiones de la cañería y la resistividad del terreno.

Una técnica útil y sencilla para evaluar la calidad de un revestimiento aislante y su impacto con relación al costo global del sistema (teniendo en cuenta el consumo energético impuesto al sistema de protección catódica) consiste en determinar las necesidades de corriente que éste debe suministrar para compensar las pérdidas a través del revestimiento.

Obviamente, cuanto mayor sea la perfección del revestimiento aplicado, mayor será el alcance de la corriente de protección y menor su magnitud por lo que se reducirán las necesidades de protección catódica así su instalación.

En el caso de las redes de distribución, el problema del revestimiento se acentúa de manera considerable en comparación con los gasoductos de transporte, pues la discontinuidad en la cobertura es mucho mayor. Motivo de ello son las numerosas reparaciones ("parches") que deben efectuarse en el proceso de construcción de una red, asociadas generalmente a fallas de obrador, daños por soldaduras y, también, a la gran cantidad de cortes y empalmes requeridos en una red por su condición de reticulado.

A parte de esas posibles causales de fallas, hay que tener en cuenta la bajada a zanja, por lo general estrecha y de bordes cortantes, además de objetos duros o ásperos que puedan introducirse accidentalmente entre la cañería y el fondo de zanja durante esta operación.

Otro caso bastante difundido de fallas o roturas en la cobertura durante la operación de la cañería es el debido a tareas realizadas por terceros sobre la misma traza o en sus inmediaciones.

Todas estas causales de falla en los revestimientos disminuyen significativamente en el caso de los gasoductos ya que, por regla general, la mayor parte de su recorrido se sitúa en zonas despobladas, con menor probabilidad de interferencia con otros servicios u obras.

En términos estadísticos, las líneas cortas presentan más dificultades de instalación que las de mayor extensión, y una red bien puede asimilarse a un conjunto de líneas cortas. Debido a ello, la necesidad de corriente y por lo tanto los costo de instalación y operación de los sistemas de protección catódica serán proporcionalmente mayores en las redes que en los gasoductos.

Como dato ilustrativo, la necesidad de corriente de una red bien construida y carente de servicios domiciliarios oscila entre 100 y 500 $\mu\text{A}/\text{m}^2$, mientras que en los gasoductos de transporte esa densidad de corriente se reduce al orden de 70 a 200 $\mu\text{A}/\text{m}^2$.

La necesidad de corriente de una red aumenta paulatinamente a medida que se conectan nuevos servicios. En condiciones normales, la conexión de servicios bien revestidos y convenientemente aislados de la cañería interna de los domicilios, no debería representar un incremento significativo en la corriente necesaria para la protección del sistema.

Sin embargo, la escasa noción que a menudo poseen los instaladores en lo que se refiere a técnicas de revestimiento y aislación, provoca que en una red originalmente exenta de servicios, se eleve el consumo de corriente hasta alcanzar valores varias veces superiores a los que demandaba antes de abastecer un consumo residencial extendido.

2.2 Clasificación y propiedades de los revestimientos anticorrosivos

El desarrollo de nuevos productos y técnicas de aplicación, así como las notables mejoras en las propiedades y confiabilidad de revestimientos ya existentes, ha caracterizado y revolucionado la práctica de la protección anticorrosiva en los últimos 20 años, constituyendo probablemente el campo en el cual esta industria ha experimentado el avance más espectacular.

Es así que algunos tipos de revestimiento, de uso muy generalizado en el pasado, han caído virtualmente en desuso, sobreviviendo casi exclusivamente en cañerías antiguas, con varias décadas de servicio.

Tal es el caso de los revestimientos asfálticos, los cuales fueron progresivamente sustituidos por otros productos de calidad y facilidad de aplicación muy superior, tales como las poliolefinas extruídas (sistemas bi-capa y tri-capa) o las resinas epoxi en polvo (*Fusion Bonded Epoxi o FBE*)

Un proceso similar han venido sufriendo los revestimientos a base de cintas (petrolato, polietileno reforzado, etc.), particularmente en las cañerías de mayor diámetro.

A continuación se incluye una clasificación y caracterización de las distintas clases de revestimiento aplicables para la protección anticorrosiva de cañerías metálicas, reproducida de la Ref. [11] De acuerdo a lo aclarado antes, algunos de los productos y/o técnicas de aplicación referidas en dicha Norma han caído en desuso, particularmente en lo que se refiere al proyecto y especificación de nuevos servicios.

Su inclusión se motiva, por lo tanto, en la intención de brindar un panorama completo de las alternativas disponibles tanto en un pasado reciente como en la actualidad, facilitando además la comprensión del notable avance logrado en un período de tiempo relativamente breve.

Se recomienda consultar en la Ref. [11] los requerimientos mínimos limitaciones relativas a presión y temperatura de servicio, diámetro nominal de la cañería, condiciones de aplicación, rangos de resistividad del terreno y propiedades físico-químicas de los componentes, para cada tipo de revestimiento.

GRUPO A: Revestimiento de base asfáltica con envolturas de refuerzo.

El revestimiento de base asfáltica con envolturas de refuerzo consiste en la aplicación, por chorreado y en caliente, de material bituminoso sobre la cañería previamente granallada e imprimada con una pintura adecuada.

Simultáneamente, se realiza un arrollamiento helicoidal con velo de vidrio reforzado a fin de aumentar la rigidez mecánica de la película asfáltica.

Finalmente se efectúa otro arrollamiento helicoidal con velo de vidrio saturado con asfalto a modo de protección mecánica del esquema.

Guía de aplicación: Los materiales de base asfáltica con envoltura exterior de refuerzo se podrán emplear como recubrimiento integral de cañerías únicamente para la protección aislante de redes de distribución domiciliaria ($P \leq 1,5 \text{ Kgr/cm}^2$). La aplicación debe efectuarse en Plantas de Revestimiento hasta una distancia de 150 mm como máximo, de los extremos, con miras a la ejecución de la unión soldada.

GRUPO B: Revestimientos laminados plásticos

Los revestimientos laminados plásticos consisten en películas plásticas de base, tales como polietileno, cloruro de polivinilo, polipropileno o polibuteno de espesor delgado, que sirven de sostén a compuestos laminados que cubren una de sus caras o ambas.

Estos compuestos estarán constituidos por caucho butílico, alquitrán de hulla con resinas plastificantes o la combinación de ellos pudiendo llevar o no entramados de refuerzo, siendo a su vez aplicados en frío o en caliente según el tipo, sobre la superficie de acero previamente imprimida.

Guía de aplicación: Los laminados plásticos están exclusivamente indicados para aplicación manual en el revestimiento de uniones soldadas, tramos cortos de tuberías, caños camisa, derivaciones domiciliarias, parches de soldaduras cuproaluminotérmicas y para el reforrado de cañerías ya instaladas.

GRUPO C: Revestimientos con cintas de polietileno con envoltura exterior de refuerzo

Los revestimientos a base de cintas de polietileno están constituidos por películas de este material recubiertas en una de sus caras por un compuesto adhesivo anticorrosivo en cuya formulación intervienen materiales bituminosos, caucho butílico y resinas sintéticas.

Se emplean exclusivamente como recubrimiento integral de cañerías. El esquema completo consiste en el arrollamiento helicoidal de dos cintas: una interior, de protección anticorrosiva, aplicada sobre la superficie de acero previamente imprimada y otra exterior de protección mecánica.

En la interior los espesores de polietileno y adhesivo son del mismo orden de magnitud, mientras que en la exterior el espesor de polietileno es superior confiriéndole mayor rigidez.

Guía de aplicación: La aplicación de las cintas plásticas de polietileno, tanto interior como exterior, se puede realizar en línea o en plantas fijas, mediante equipos adecuados. No se permite su uso en aplicaciones manuales.

GRUPO D: Mastics asfálticos

Los *mastics* o *masillas asfálticas* son mezclas de asfaltos y solventes seleccionados con fibras, carga mineral, resinas sintéticas, caucho butílico, etc.

Guía de aplicación: Los mastics asfálticos están destinados únicamente al revestimiento de piezas geométricamente irregulares enterradas (válvulas, bridas, tees de derivación, etc.) No se admite su utilización para el revestimiento integral de tuberías o tramos cortos de las mismas (curvas o codos)

GRUPO E: Revestimiento a base de resinas epoxi

Los revestimientos a base de resinas epoxi se obtienen por la reacción química de polimerización de las mismas, sobre la superficie de acero.

Este proceso es acelerado por un endurecedor o catalizador, en el caso de las pinturas epoxi líquidas o por el suministro de calor, en el caso de las resinas epoxi en polvo fundidas.

Subgrupo E1: Revestimientos a base de resinas epoxi en polvo

Las resinas epoxi en polvo fundidas (*FBE* o *Fusion Bonded Epoxi*) se emplean para la cobertura integral de cañerías y accesorios (válvulas, bridas, tees de derivación, etc.), previamente calentados a la temperatura recomendada por el fabricante, en plantas de revestimiento especialmente montadas para este fin.

También se pueden aplicar para el recubrimiento de uniones soldadas en obra con equipos especiales de campo. La aplicación se puede efectuar por dos métodos distintos:

- Lecho fluidificado (para cañerías de hasta 8" de diámetro)
- Sistema electrostático (para cualquier diámetro)

Guía de aplicación: Las resinas epoxi en polvo fundidas descriptas como subgrupo E1 se emplean para el revestimiento integral de cañerías o de accesorios. La aplicación se efectúa en Plantas de Revestimientos hasta una distancia de 150 mm como máximo, de los extremos, con miras a la ejecución de la unión soldada. Esta última también puede recubrirse con la misma resina, utilizando equipos de limpieza, calentamiento y pintado de campo especialmente diseñados para ese propósito.

Subgrupo E2: Revestimientos a base de resinas epoxi líquidas

Las resinas epoxi líquidas podrán ser o no bituminosas. En ambos casos deberán ser autoimprimantes, es decir de aplicación directa sobre el sustrato

metálico, con o sin calentamiento previo de la superficie o de los componentes del producto.

La temperatura máxima admisible del sustrato o de los componentes será la recomendada por el fabricante.

Guía de aplicación: Las resinas epoxi líquidas se podrán emplear solamente para el recubrimiento de tramos de cañerías o accesorios ya instalados en tareas de reacondicionamiento de los mismos o para el revestimiento de piezas irregulares nuevas. La operación de pintado se hará:

- En plantas de revestimiento, en talleres de montaje o en fábricas de accesorios, exclusivamente con equipos “air less” o sopletes convencionales.
- En trabajos de campo (reacondicionamiento de cañerías o accesorios ya instalados, pintado de juntas de soldadura, etc.), se podrán emplear, además de los mencionados en a), pinceles o rodillos.

En el caso de tramos de tuberías o accesorios que conduzcan gas natural que hayan de operar aéreos o en cámara (por ej. plantas reguladoras) sólo se podrán pintar con epoxi no-bituminoso de color amarillo IRAM DEF 5-050.

GRUPO F: Cintas de petróleo

Las Cintas de Petróleo están constituidas por tejidos de fibras sintéticas o de vidrio de soporte, totalmente impregnados de petróleo y cubierta una de sus caras con una lámina plástica (polietileno, PVC, polipropileno, etc.)

Se aplican directamente sobre la superficie de acero previamente acondicionada, salvo indicación del fabricante que exija algún tipo de imprimación.

Guía de aplicación: Las cintas de petróleo se pueden emplear únicamente para el revestimiento de tees de derivación enterradas en las redes de distribución domiciliaria (Presión de operación $\leq 1,5$ Kgr/cm²) o para reparaciones de emergencia (revestimiento provisorio)

GRUPO G: Revestimiento de poliolefinas extruídas

Revestimiento plástico consistente en una película de poliolefina (polietileno o polipropileno) extruída en forma continua y adherida la superficie del caño mediante adhesivo aplicado en caliente.

La resina poliolefínica debe constituir una cobertura continua sin costuras ni solapas y se podrá aplicar por cualquiera de los dos tipos de extrusión:

- Extrusión coaxial (hasta 12" de diámetro)
- Extrusión lateral (para diámetros superiores a 4")

El adhesivo deberá responder a cualquiera de los siguientes tipos:

- Mástics (blandos) aplicados mediante anillo de frotamiento.
- Compuestos butílicos (blandos)
- Polímeros (duros)
- Copolímeros (duros)

Los tres últimos aplicados por extrusión previo calentamiento de tubería a la temperatura especificada por el fabricante.

Todas las combinaciones posibles de poliolefina y adhesivo se denominarán *sistemas bicapa*. Cuando se trate de poliolefina y adhesivo duro ambos aplicados por extrusión sobre una cañería previamente imprimada con resina epoxi polvo, se denominará *sistema tricapa*.

Guía de aplicación: Las poliolefinas extruídas descriptas en el Grupo G, se emplean como revestimiento integral de cañerías. La aplicación se efectúa en obrador hasta una distancia de 150 mm como máximo, de los extremos, con miras a la ejecución de la unión soldada.

Subgrupo G1: Polietileno extruído. Sistema bicapa con adhesivos blandos tipo mastics.

Subgrupo G2: Polietileno extruído. Sistema bicapa con adhesivos blandos a base de compuestos butílicos.

Subgrupo G3: Polietileno extruído. Sistema bicapa con adhesivos duros.

Subgrupo G4: Polietileno extruído. Sistema tricapa.

El sistema denominado *Polietileno Extruído Tricapa* consiste en:

- Una película de resina epoxi en polvo de 50 micrones de espesor como mínimo, aplicado por medios electrostáticos.
- Una película de (co) o (ter) polímero, destinado a asegurar adherencia entre la primera y tercera capa, de espesor mínimo 3 micrones, aplicada por extrusión.
- Una capa de polietileno aplicada por extrusión.

Subgrupo G5: Polipropileno extruído. Sistema tricapa

El sistema denominado *Polipropileno Extruido Tricapa* consiste en:

- Una película de resina epoxi en polvo de 50 micrones de espesor como mínimo, aplicado por medios electrostáticos.
- Una película de co o terpolímero, destinado a asegurar la adherencia entre primera y tercera capa, de espesor mínimo 30 micrones, aplicada por extrusión.
- Una capa de polipropileno aplicada por extrusión.

GRUPO H: Revestimientos a base de poliolefinas termocontraibles

Los revestimientos a base de Poliolefinas Termocontraibles son láminas constituidas por dos elementos básicos:

- Una capa externa termocontraible.
- Una capa interna de adhesivo.

El material de la capa externa termocontraible es un polímero, en general polietileno, transformado de material termoplástico en termoestable con "memoria elástica".

Esta característica se logra mediante irradiación de electrones de alta energía cinética sobre su estructura molecular.

El adhesivo de la capa interna, que se aplica sobre las superficies ferrosas, puede ser de tipo mastic o bien termoplástico. Este último posee mayor resistencia a los esfuerzos de corte que actúan en la interfase metal-revestimiento.

Por otra parte, se distinguen también los sistemas termocontraibles de baja o alta relación de contracción según tengan que cubrir superficies regulares o con resaltes geométricos, respectivamente.

Se presentan en general en forma de cintas, mantos, tubos, manguitos o piezas moldeadas.

Los materiales termocontraibles se aplican sobre la superficie de acero a cubrir, previamente acondicionada y calentada a la temperatura especificada por el fabricante. La cara interior del revestimiento, al tomar contacto con el sustrato caliente se funde y se adhiere fuertemente a éste. El calentamiento posterior de la cara externa provoca la contracción del polímero, ajustando el conjunto a la superficie cubierta.

Algunos productos termocontraibles incluyen en la operación de aplicación, la imprimación previa del área a revestir mediante una resina epoxídica, lo cual disminuye notablemente la temperatura requerida para el sustrato. A este tipo de esquema se lo denomina sistema epoxi-poliolefina termocontraible.

Guía de aplicación

- a) Las cintas termocontraibles descriptas en los subgrupos H2 y H3, se emplean como revestimiento integral de cañerías. La aplicación se efectúa en Plantas de Revestimiento hasta una distancia de 150 mm como máximo, de los extremos, con miras a la ejecución de la unión soldada.
- b) Las Mantas y Tubos de baja relación de contracción se pueden emplear en:
 - Revestimiento de uniones soldadas.
 - Revestimiento de tramos rectos y cortos de tubería.
 - Reparación de revestimientos dañados.
- c) Las Mantas y Tubos de alta relación de contracción y las piezas moldeadas termocontraibles se pueden emplear en:
 - Revestimiento de uniones bridadas.
 - Revestimiento de tees de derivación.
 - Sellado entre caños camisa y caños conductores.
 - Sellado de juntas campana / espiga.

SUBGRUPO H1: Mantas y tubos de alta y baja relación de contracción.

SUBGRUPO H2: Cintas termocontraibles

SUBGRUPO H3: Cintas termocontraibles de gran flexibilidad

SUBGRUPO H4: Piezas moldeadas termocontraibles

2.3 Sistemas de pinturas como protección anticorrosiva [12]

Las pinturas constituyen el sistema de protección más ampliamente utilizado para la protección anticorrosiva en instalaciones de superficie, ya que son relativamente baratas, pueden ser aplicadas por personal no calificado o semi – calificado, pueden aplicarse en el taller o a pie de obra, pueden combinarse con otros recubrimientos protectores y la gran diversidad de tipos con diferentes características y resistencia hacen que prácticamente no haya superficie a la que no puedan ser aplicadas, si se exceptúan las destinadas soportar temperaturas muy elevadas.

2.3.1 Recubrimientos de pintura

Las pinturas son mezclas líquidas que al ser aplicadas sobre una superficie tienen la propiedad de formar una capa continua y de transformarse en una película sólida. Se compone de una fase sólida (*pigmento*) y una fase líquida (*barniz* o *laca*)

El pigmento puede dividirse en dos categorías:

- *Imprimadores ("primers")*: proporcionan color, poder ocultante y protección del sustrato por inhibición de la corrosión.
- *Extendedores*: modifican las propiedades mecánicas de la película y se comportan como relleno para tapar los poros.

El barniz consiste en una mezcla de un disolvente volátil aglutinante y varios aditivos, en particular:

- *Aglutinante* o *vehículo fijo* es el formador de la película y es usualmente un polímero o componentes reactivos que forman un polímero durante el secado, definiendo en gran medida las propiedades básicas de la pintura.
- *Aceleradores de curado*, que permiten reducir los tiempos de espera entre aplicaciones sucesivas y son de particular interés en trabajos a pie de obra.
- Otros aditivos, tales como catalizadores, agentes humectantes, plastificantes, etc.

El disolvente volátil sirve para controlar la viscosidad de la pintura y su velocidad de secado. Las principales sustancias utilizadas como disolventes en la fabricación de las pinturas son hidrocarburos, o bien, disolventes oxigenados.

Entre los hidrocarburos utilizados como disolventes se encuentran:

- Hidrocarburos cíclicos no saturados: benceno, tolueno, etc.

- Hidrocarburos cíclicos saturados de cadena abierta: ciclopentano, cicloexano etc.
- Hidrocarburos saturados: hexano, heptano etc.

Entre los disolventes oxigenados pueden mencionarse:

- Alcoholos
- Ésteres
- Éteres
- Cetonas
- Terpenos

Actualmente, se dispone de pinturas formuladas para satisfacer requisitos de aplicación y servicio sumamente exigentes, lo cual brinda una versatilidad extraordinaria al momento de evaluar su selección. Desde el punto de vista específico de su utilización con fines de protección anticorrosiva en estructuras metálicas, particularmente para trabajos en campo, podemos mencionar:

- Capacidad de curado a bajas temperaturas; algunos revestimientos epoxídicos pueden aplicarse aún a temperaturas tan bajas como -2 °C.
- Velocidad de curado y secado: la dramática disminución en los tiempos mínimos de curado y secado que se ha logrado con las nuevas formulaciones posibilita la utilización de ciertos productos que, como en el caso de los poliuretanos, ofrecen excelente resistencia a la abrasión y acción de contaminantes, unido a muy buenas propiedades desde el punto de vista anticorrosivo, pero que presentaban la limitación de un tiempo de curado y secado notablemente prolongado, lo cual dificultaba y encarecía significativamente su aplicación en campo. Hoy día, estos tiempos se han reducido al orden de minutos o segundos a temperatura ambiente, promoviendo un impulso notable al empleo de estos productos, tanto para la protección de instalaciones de superficie como de cañerías enterradas, válvulas, accesorios y uniones soldadas
- Vida útil de los componentes previo a su mezclado (*shell life*) y de la propia mezcla (*pot life*) relativamente prolongada; por ejemplo, hasta 2 o 3 horas a temperatura ambiente.
- Altos contenido de sólidos (hasta 80 o 90 %)
- Espesores de film elevados por aplicación (150 a 250 µm)
- Pueden ser de auto-imprimación, es decir, no requieren la aplicación previa de *primer*.
- Facilidad de aplicación y reparación de imperfecciones o daños.
- Alta adaptabilidad y tolerancia a las condiciones de la superficie (*surface-tolerant*) En este sentido, se han desarrollado productos muy específicos

que pueden ser aplicados, sin compromiso de sus propiedades, en superficies húmedas o aún con presencia de contaminantes; por ejemplo, algunas variedades de epoxis pueden penetrar películas de contaminación superficial por hidrocarburos, absorber y encapsular las partículas oleosas en el film. En otros casos, se ha logrado reducir los requerimientos de eliminación del óxido superficial, aunque siempre resulta imprescindible un grado mínimo de limpieza mecánica para eliminar costras o depósitos significativos de herrumbre.

2.3.2 Tipos de pigmento

Los pigmentos empleados para la fabricación de las pinturas tienen distinta finalidad en su formulación, muchos tienen forma de diminutas laminillas (variedad *micacea*) para aumentar la impermeabilidad de las capas de pintura.

Además de la impermeabilidad, las principales funciones de los pigmentos son los siguientes:

- *Inertes*: Ejercen un papel de relleno, dificultando el paso de los reactivos químicos a través de la capa de pintura. El talco y el dióxido de titanio son ejemplos de pigmentos inertes.
- *Coloreados*: La finalidad de estos pigmentos es dar color a las capas de pinturas ej: óxido crómico (verde), óxido cuproso (rojo) etc.
- *Anticorrosivos*: Existen los inhibidores como por ej. el minio Pb_3O_4 , el silicato de cinc $ZnSiO_3$ y el cromato de cinc $ZnCrO_4$, y los metales de sacrificio que actúan como ánodos utilizados en la protección catódica, como por ej. el polvo de cinc y el polvo de aluminio.
- *Ignífugos*: Los pigmentos ignífugos, como por ej. el óxido antimonioso Sb_2O_3 , por calentamiento se convierte en óxido antimónico, Sb_2O_5 , consumiendo el oxígeno del ambiente y, por lo tanto, disminuyendo la facilidad de la combustión por motivar la ausencia de comburente.
- *Dispersantes*: Algunos pigmentos, como el negro carbón, actúan facilitando la dispersión de los componentes de la suspensión que es la pintura.

2.3.3 Mecanismos de protección de la película de pintura

El propósito de la pintura es actuar como una barrera entre el medio ambiente y el sustrato metálico y ha sido descrito como una combinación de una barrera física, un inhibidor químico y una resistencia eléctrica.

Los recubrimientos de pinturas tratan de impedir, o al menos frenar (mitigar), el proceso corrosivo del sustrato metálico por algunos de los siguientes mecanismos.

Efecto barrera: La película de pintura limita el acceso a la superficie del metal de las especies químicas presentes en el electrolito (agua, oxígeno, iones, etc.) La protección por películas de pinturas ha sido descrita electroquímicamente como causante de un grado de polarización por resistencia, debida a su alta resistencia eléctrica; polarización catódica, debida a la restringida penetración de oxígeno a través de ella, y polarización por concentración ya que los iones metálicos liberados por la reacción anódica no pasarán directamente a la solución lejos de los sitios reactivos.

Efecto inhibidor: Las películas de pintura pueden contener inhibidores de la corrosión en su formulación, de modo que cuando electrolito difunde a través del recubrimiento hacia el metal y se crean las condiciones propicias para que se verifique el proceso de corrosión, estas especies inhibidoras incrementan la polarización de los ánodos y/o cátodos reduciendo por lo tanto la magnitud del fenómeno corrosivo.

Efecto de protección catódica: Ciertas pinturas están formuladas a base de pigmentos metálicos (usualmente cinc) que actúan de ánodo en beneficio del soporte metálico que actúa como cátodo. Como sabemos, la disolución metálica (corrosión) se produce en los ánodos mientras que los cátodos permanecen inalterados y el mecanismo básico de la protección catódica es que toda la superficie se protege por hacerla actuar de cátodo.

Efecto de la resistencia iónica: La corriente de las celdas de corrosión se reduce a niveles muy bajos por el obstáculo que la película de pintura ofrece al movimiento de los iones en el electrolito en contacto con el metal. Se acepta en la actualidad como el mecanismo principal de protección anticorrosiva que ofrecen los recubrimientos de pintura. La resistencia iónica estará afectada por diversos factores:

- Presencia de electrolitos en o debajo de la película de pintura.
- Penetración de agua u otros electrolitos a través del recubrimiento.
- Espesor de la película.

Encapsulamiento: Ciertos tipos de pinturas, tales como las resinas epoxídicas, brindan un efecto pasivador de la superficie metálica, al copiar perfectamente su contorno, penetrando en poros e imperfecciones y encapsulando las partículas de óxido adheridas (puntos catódicos con respecto al material adyacente, potenciales inicios de procesos corrosivos) que puedan haber sobrevivido a la preparación y limpieza preliminar de la superficie.

2.3.4 Esquemas de pinturas

Por lo general en la protección por recubrimientos orgánicos de pinturas no se emplea una única pintura sino una serie de ellas, cada una con distinta misión, lo que se denomina *esquema de pintura*.

Se componen, como máximo, de cuatro pinturas diferentes: *pre-tratamiento, imprimación, intermedia* y *acabado*, aunque con frecuencia quedan reducidas a dos o tres de ellas. Tales componentes, mientras cumplen su propia función, deben estar relacionados unos con otros de modo que el esquema completo se comporta como un simple elemento.

De la pintura de imprimación dependen dos propiedades fundamentales del esquema, a saber: control de la corrosión y adherencia.

Las pinturas intermedias (cuando se aplican) tienen como misión adherirse fuertemente a la capa de imprimación, dotar de espesor al sistema y suministrar una buena superficie para su unión con la de acabado. No es necesario que sean resistentes al medio ambiente pues no estarán directamente expuestas al mismo.

La pintura de acabado tiene como características la de poseer una gran resistencia al ambiente en contacto, retención del brillo y color. De particular importancia en el caso de esquemas aplicados en instalaciones de superficie, resulta la utilización de pinturas acrílicas de acabado, que brindan protección al substrato anticorrosivo (por ejemplo, epoxi, uretanos, etc.) contra la acción degradativa de los rayos UV.

Para que un esquema de pintura funcione correctamente es fundamental el estado inicial de la superficial, lo cual constituye un dato fundamental para su selección y formulación. En efecto, la contaminación superficial y el grado de oxidación, limitan en general la vida útil del esquema.

Muchos contaminantes (grasa, polvo, agua) pueden eliminarse con facilidad, pero la cascarilla y herrumbre solo se desprenden por aplicación de procedimientos relativamente laboriosos y costosos.

2.3.5 Procedimientos de pintado

La aplicación de pinturas a los sustratos se lleva a cabo normalmente mediante brocha o pistola. En algunos casos, también se recurre el rodillo. En circunstancias especiales, es necesario utilizar procedimientos de inmersión o aplicación a espátula, así como pulverización hidráulica.

Aplicación a brocha: En la mayoría de los casos, se recomienda que la primera capa de imprimación se aplique a brocha. Ello es debido a que la pintura moja adecuadamente al sustrato y penetra más profundamente. El mejor procedimiento será cargar abundantemente la brocha, y extender la pintura sobre la superficie de manera uniforme. Los resultados óptimos se obtienen extendiendo la pintura desde el sustrato todavía sin pintar hacia las zonas previamente pintadas.

Aplicación a pistola: La mayor parte de los recubrimientos para mantenimiento se aplican a pistola. Este método, además de ser más rápido que los demás, excepto la inmersión, proporciona una película de espesor más uniforme. Debido a que la presión de aire es la fuerza en la aplicación a pistola, será

fundamentalmente disponer de un compresor que proporcione un caudal adecuado a 7 Kg/cm² de presión. La mayoría de los equipos de aplicación a pistola necesitan un caudal de aire de aproximadamente 30 lt/min.

Pulverización hidráulica: Actualmente está consiguiendo gran aceptación un tipo relativamente reciente de equipos de pulverización hidráulicos, llamados también *sin aire* ("air-less") En estos equipos no se emplea el aire para la atomización del fluido. La pulverización se obtiene simplemente forzando el paso de la pintura, sometida a alta presión, a través de un orificio extremadamente pequeño. Cuando el material atraviesa el orificio, se expande y es proyectado sobre la superficie a pintar en forma de gotas muy pequeñas.

2.3.6 Esquemas para la protección de instalaciones de superficie

Al momento de especificar un esquema de pinturas para la protección anticorrosiva de las instalaciones metálicas de superficie (estaciones de medición y regulación, válvulas, tanques, recipientes, gabinetes, etc.) el proyectista deberá tomar en consideración y definir en las especificaciones y procedimientos técnicos correspondientes los siguientes elementos:

- Reglamentaciones y estándares de diseño aplicables
- Las condiciones de servicio de la instalación: temperatura y presión de operación, manejo de sustancias agresivas, etc.
- Condiciones ambientales: temperatura y humedad ambiente, agresividad del medio, contaminación atmosférica, salinidad, etc.
- Esquema de colores y definición de esquemas aplicables en cada estructura o componente.
- Características del esquema definido: estructura y definición de componentes, espesores de cada componente, espesor total, número de capas aplicadas para cada componente, adherencia, resistencia a la abrasión y a la identación, etc.
- Características técnicas de los productos constitutivos del esquema seleccionado: propiedades físicas (densidad, viscosidad, contenido de sólidos, relación de mezclado, punto de inflamación, *shell life*, *pot life*, espesor máximo sin "descuelgue", curvas de curado); procedimientos de conservación, manipulación y preparación, estabilidad química, toxicidad.
- Técnica de aplicación: calificación del personal, aplicación en taller o en campo, preparación, decapado y control previo de la superficie (limpieza, arenado, granallado, verificación de anclaje, precalentamiento, etc.), método de aplicación (brocha, rodillo, pulverización con o sin aire; diámetro de boquillas, presión y caudal de pulverización, cuando corresponda; número y espesos de capas), condiciones ambientales limitantes para la aplicación (temperatura, humedad, viento, radiación solar) protección de la superficie durante el período de curado, condiciones de secado, etc.

- Controles e inspecciones requeridas: control de calidad y certificación de los productos empleados, medición de espesores, inspección visual, ensayos de adherencia, etc.
- Criterios de aceptación y métodos de reparación de imperfecciones o daños.

En el caso de instalaciones de superficie para gas y petróleo, operando a temperatura ambiente, algunos de los esquemas más utilizados son los siguientes:

Esquemas epoxídicos

Compuestos por resina epoxi autoimprimante con alto contenido de sólidos y esmalte sintético brillante como acabado para la protección contra factores ambientales, particularmente radiación UV.

En ambientes medianamente agresivos, próximos a zonas pobladas pero no excesivamente polucionadas, es aplicable un esquema de 500 micrones (420 micrones de epoxi, aplicado en capas de aproximadamente 100 micrones, y 80 micrones de esmalte) con una vida útil estimada de 10 años.

El espesor de epoxi puede incrementarse, pero no al punto de comprometer su integridad por excesiva fragilidad, particularmente durante el traslado y montaje de equipos pintados en taller. En general, no es de esperar que la capa de epoxi se torne excesivamente quebradiza por lo menos hasta los 800 micrones.

El esquema epoxídico es aplicable en equipos, recipientes y cañerías de superficie sometidas a presión, con temperaturas de operación inferiores a los 50 °C.

Esquemas epoxi-poliuretánicos

Imprimación de epoxi similar al anterior, con espesores en el orden de 300 a 400 micrones y acabado de resina poliuretánica alifática en 100 micrones. De aplicación análoga a la de los esquemas epoxídicos y también de utilidad en accesorios enterrados o semi-enterrados (incrementando el espesor de poliuretano, por ejemplo a 500 micrones) brinda una excelente protección anticorrosiva y mecánica (abrasión, identación, etc.)

Esquemas poliuretánicos

Base de anti-óxido al cromato de cinc, aplicado en taller previamente a la instalación, a fin de proteger temporalmente la superficie durante su manipulación, transporte y montaje. Una vez instalada, se procede al arenado para limpieza a metal blanco y formación del perfil anclaje a 100 micrones,

imprimación epoxi (si se requiere, de acuerdo a las instrucciones del fabricante) y acabado de resina poliuretánica aplicada por medio de air-less en campo, una vez instalada la pieza. Es recomendable para válvulas y accesorios enterrados o semi-enterrados, con espesores de poliuretano en el orden de 800 micrones para suelos neutros y 1,600 micrones en suelos agresivos o contaminados.

Esquemas anti-óxido-esmalte

Aplicables en instalaciones accesorias y perimetrales (cartelería, mojones, cerramientos, tinglados, gabinetes, tapas de cámaras, etc.) Compuesto por pre-tratamiento con dos capas de anti-óxido al cromato de cinc y acabado con dos capas de esmalte sintético brillante.

3 Técnicas de Protección Catódica

3.1 Consideraciones generales

Al conocer el origen de la corrosión y asumir la teoría electroquímica del proceso generado, se acepta que un ánodo es un elemento de sacrificio frente a un cátodo que se preserva, todo ello en el seno de un medio electrolito común a ambos.

Cuando se instala una cañería de acero, si bien se le provee de una protección aislante del medio circundante, habrá que complementar esta protección de manera de garantizar que el conducto no se corroa.

Por lo tanto, y dado que en la práctica ninguna técnica “pasiva” de protección anticorrosiva (pinturas, revestimientos, inhibidores, etc.) es capaz de garantizar una protección absoluta y perfecta de una estructura metálica enterrada o sumergida pasible de ser corroída, es necesario aplicar un sistema complementario o “activo” de protección anticorrosiva.

La idea fundamental consiste en lograr que la cañería o estructura a proteger se comporte como cátodo frente a un ánodo de sacrificio, por lo cual dichos sistemas se denominan de “protección catódica”.

Existen básicamente dos alternativas posibles para su implementación, dependiendo la elección de un conjunto de variables económicas y técnicas a ser evaluadas:

- *Sistemas Galvánicos o de Ánodos de Sacrificio*
- *Sistemas de Corriente Impresa*

Si se aplican estas técnicas adecuadamente, la cañería mantendrá su superficie metálica exterior libre de corrosión, a lo largo de toda su vida útil. Obviamente en esta tarea incide significativamente el mantenimiento de las instalaciones.

Los resultados de la aplicación de un sistema de protección catódica son cuantificables a través de la medición del potencial eléctrico que asume la cañería con respecto a un electrodo de referencia, debiendo satisfacerse, para que la labor sea eficaz, los criterios especificados en los estándares de aplicación, a los que nos referiremos más adelante.

3.2 Sistemas galvánicos

3.2.1 Fundamentos

Los sistemas galvánicos de protección anticorrosiva se basan en el uso de un elemento que produzca la variación de potencial necesario para poder convertir la estructura en cátodo y así minimizar el efecto de la corrosión. Este elemento funciona como *ánodo de sacrificio*, consumiéndose por corrosión durante el proceso.

Las principales virtudes y limitaciones que presenta esta técnica de protección catódica son las siguientes:

Ventajas:

- No requiere suministro de energía exterior
- Mínimo costo de mantenimiento una vez instalado
- Raramente causa problemas de interferencia con estructuras vecinas
- Utilización más eficiente de la corriente de protección, por permitir una mejor distribución de la misma

Desventajas:

- Limitación del potencial disponible
- Corriente de salida reducida y limitada
- Limitaciones en función de la resistividad del terreno
- No es idóneo para la protección de cañerías de gran diámetro, desnudas o pobemente revestidas

Pautas para la elección de un sistema galvánico de protección catódica:

En función de lo anterior, existen algunos factores clave que determinan la conveniencia (o no) de utilizar un sistema galvánico para la protección de una estructura dada:

- No hay disponibilidad de energía eléctrica.
- Se requieren cantidades reducidas de corriente para la protección del conductor.
- La resistividad del terreno no es muy elevada.

Tipos de ánodos galvánicos:

Los ánodos más comúnmente utilizados para la protección galvánica de estructuras enterradas son los siguientes:

- Ánodos de magnesio: Existen dos aleaciones disponibles en el mercado, conocidas como AZ63-A y GALVOMAG (alto potencial). Para suelos con valores de resistividad comprendidos entre 1,500 Ωcm y 3000 Ωcm suele

emplearse el AZ63-A. Para resistividades más elevadas, y hasta 8,000 Ωcm es recomendable el GALVOMAG. El potencial de salida del AZ63-A es de –1,450 mV, mientras que el GALVOMAG suministra –1,700 mV.

- Ánodos de cinc: Se utiliza en suelos con resistividad inferior a 1,500 Ω/cm y también en estructuras submarinas. Su potencial de salida es del orden de los –1,100 mV.
- Ánodos continuos de cinc o magnesio: Se fabrican con una geometría adecuada para la protección de estructuras tales como bases de recipientes de fondo plano apoyados directamente en el terreno; en este caso, se instalan en forma de anillos concéntricos por debajo de la base. Si bien no trataremos en estas notas sobre la utilización de esta técnica, puede consultarse un ejemplo típico de aplicación en la Ref. [25]

3.2.2 Procedimiento de cálculo

En el proyecto de una nueva instalación de protección catódica por ánodos de sacrificio deben definirse los valores aceptables de densidad superficial de corriente (i) Para ello se estima:

- Cañerías en una red de distribución: $i = 0.5 \text{ mA/m}^2$
- Gasoducto de distribución: $i = 0.2 \text{ mA/m}^2$
- Gasoducto de transporte: $i = 0.05 \text{ mA/m}^2$

Adicionalmente, deberá determinarse la resistividad del terreno en el que se instalará la cañería o estructura enterrada, así como la superficie a proteger.

El procedimiento de cálculo involucra la utilización de las expresiones que se detallan a continuación. En ellas se asume una distancia de separación ánodo-cañería de 3 m, y valores de resistividad del terreno mayores a 500 Ωcm .

$$[3.1-\text{a}] \quad I_{Mg} = 150,000 \zeta Y/R$$

$$[3.1-\text{b}] \quad I_{Zn} = 50,000 \zeta Y/R$$

Donde I_{Mg} e I_{Zn} representan la *corriente de drenaje* suministrada por el material de sacrificio, expresada en mA; Y es un factor adimensionado que tiene en cuenta la variación de potencial a lo largo de la cañería (Tabla 3.1); ζ es también un factor adimensionado de corrección, función del peso del ánodo (Tabla 3.2); finalmente, R representa la resistividad del terreno, expresada en Ωcm . Los factores 150,000 y 50,000 se indican para recubrimientos anticorrosivos de baja calidad o envejecidos. Si se instalará un revestimiento de calidad superior, estos factores pueden reducirse en un 20%

Potencial mv	Y	
	Mg	Zn
850	1	1
900	0.93	0.80
1,000	0.79	0.40
1,200	0.50	0.00

Tabla 3.1: Valores del Factor Y
(Ecuación [3.1])

ζ		
Peso del Ánodo		Factor
Kg	Lb	
1.35	3	0.59
4	9	0.81
8	17	1

Tabla 3.2: Valores del Factor ζ
(Ecuación [3.1])

Una vez determinado el valor de la corriente de drenaje, se calculará la vida útil de los ánodos de sacrificio:

$$[3.2-a] \quad L_{Mg} = 125W/I$$

$$[3.2-b] \quad L_{Zn} = 84.2W/I$$

Donde L_{Mg} , L_{Zn} representa la vida útil del ánodo de sacrificio expresada en años y W representa el peso del ánodo en Kg; α es un coeficiente de rendimiento para el que generalmente se adopta el valor 0.75 (es decir, se considera que la vida útil del ánodo es tan sólo el 75% del valor teórico)

Los ánodos deben vincularse a la estructura a proteger a través de una *caja de medición de potenciales*, tanto en forma individual como cuando se dispongan en una *batería de ánodos*.

Las baterías de ánodos se diseñan generalmente conectando 3, 5 o 10 unidades en paralelo. La corriente de drenaje obtenida no será directamente equivalente al número de ánodos que la componen, dado que la proximidad recíproca entre los mismos provoca un efecto de apantallamiento que reduce su eficiencia. Dicho efecto se incorpora en el cálculo a través de un coeficiente de reducción cuyo valor depende de la distancia entre los ánodos y la disposición de los mismos (horizontal y vertical) Suponiendo que los ánodos son instalados verticalmente, son de aplicación las siguientes expresiones:

$$[3.1-c] \quad I_{Mg} = 150,000 \zeta Y N / \rho$$

$$[3.1-d] \quad I_{Mg} = 50,000 \zeta Y N / \rho$$

Donde N es el número de ánodos conectados en paralelo que componen la batería y d es el coeficiente de reducción por apantallamiento, cuyo valor se obtiene de la Tabla [3.3]

N	Distancia entre ánodos (m)			
	1,5	3	4,5	6
2	1.84	1.92	1.95	1.96
3	2.45	2.70	2.80	2.85
4	3.04	3.45	3.60	3.71
5	3.60	4.20	4.43	4.56
6	4.13	2.90	5.22	5.41
7	4.65	5.60	6.00	6.23
8	5.15	6.30	6.77	7.04
9	5.67	6.96	7.53	7.87
10	6.16	7.64	8.30	8.68

Tabla [3.3]: Coeficiente de reducción por apantallamiento
(Ecuaciones [3.1-c] y [3.1-d])

3.2.3 Instalación de ánodos galvánicos

En el terreno, los ánodos se instalan en el seno de un relleno químico (también conocido como “backfill” o “mezcla despolarizante”) compuesto fundamentalmente por yeso, bentonita y sulfato de sodio, en proporciones variables según las características del terreno. Las principales funciones de esta mezcla son:

- Minimizar la resistencia de contacto entre el ánodo y el terreno.
- Evitar los efectos nocivos de la polarización de la superficie anódica.
- Uniformizar el ataque sobre la superficie del ánodo, evitando fallas prematuras por desgaste localizado (por ejemplo, corte o “decapitación” de uno o más ánodos)

En el caso de ánodos individuales, los mismos suelen proveerse e instalarse en el interior de un saco cerrado que ya contiene el volumen y tipo apropiado de mezcla despolarizante; dicho envoltorio está fabricado con un tejido de características adecuadas para permitir la libre circulación de agua, gases e iones entre la superficie del ánodo y el terreno. Cuando se emplean baterías de ánodos, se debe excavar una “pileta” o *lecho anódico* en el cual se disponen los ánodos individuales compartiendo el mismo relleno despolarizante.

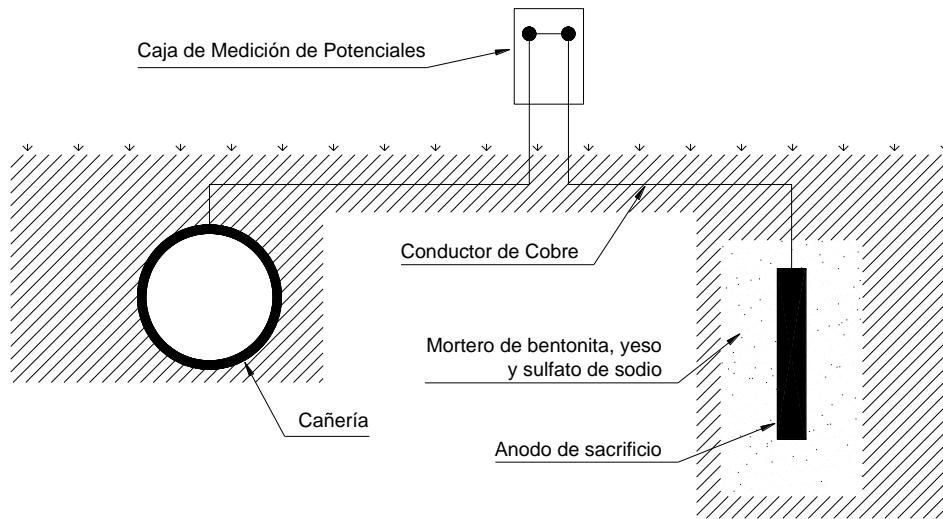


Figura [3.1]: Esquema básico de instalación de ánodos galvánicos

Composición de la mezcla despolarizante

Para suelos de alta resistividad (mayor a 5,000 Ω.cm)

- Sulfato de sodio (Na_2SO_4): 25% (-0% + 10%)
- Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - grado comercial: 25% (-0% + 10%)
- Arcilla: 50% (hasta completar)

Para suelos de resistividad media (1,500 – 5,000 Ω.cm)

- Sulfato de sodio (Na_2SO_4): 5% (-0% + 10%)
- Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - grado comercial: 75% (-0% + 10%)
- Arcilla: 20% (hasta completar)

Para suelos de baja resistividad (0 – 1.500 Ω.cm)

- Yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) - grado comercial: 50% (+/-10%)
- Arcilla: 50% (hasta completar)

Para suelos pantanosos (0 – 1.500 Ω.cm)

- Yeso semi-hidratado o “París” (CaSO_4): 50% (+/-10%)
- Arcilla: 50% (hasta completar)

Se utilizarán arcillas expansivas de base bentonítica (*montmorilonitas*) y deberá pasar en un 91% como mínimo por un tamiz de 130 μ

3.3 Sistemas de corriente impresa

3.3.1 Fundamentos

Según se ilustra en la Figura [3.2], en este caso el sistema de protección catódica consiste en una fuente externa de corriente continua conectada a la estructura que se desea proteger y a un ánodo dispersor.

El polo positivo de la fuente debe estar conectado al dispersor de corriente (ánodo) el cual es forzado entonces a descargar tanta corriente de protección catódica como se requiera, hacia la estructura a proteger (cátodo). La correcta configuración del esquema de conexión es crítico, ya que si se invierten las polaridades la estructura se convertirá en anódica en lugar de catódica, desencadenando un acelerado proceso de corrosión.

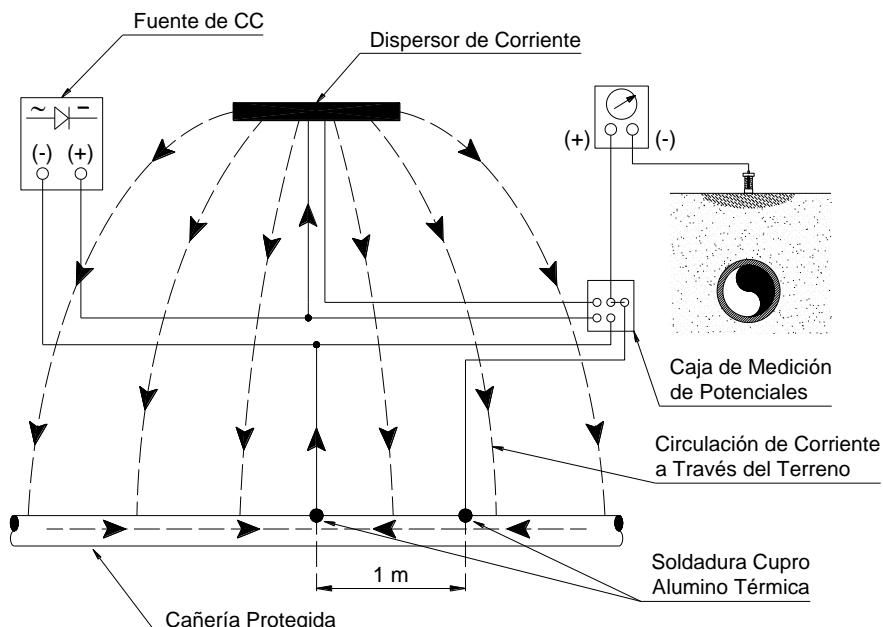


Figura [3.2]: Sistema de Protección Catódica por Corriente Impresa

En el caso de cañerías de acero, los conductores de vinculación serán de cobre, con secciones en el orden de 10 a 25 mm² (dependiendo del valor de corriente drenada) y se soldarán directamente sobre la superficie metálica de la estructura a proteger mediante una soldadura cupro-alumino térmica, protegiendo luego dicha unión mediante la correcta aplicación de mastic, manta termocontraible y/o cintas de protección anticorrosiva. La canalización de los conductores se realizará mediante conductos enterrados de PVC u otro material adecuado para uso en terreno, no degradable por la humedad, la acción mecánica del suelo o por ataque de roedores.

La fuente de corriente continua más comúnmente empleada es el transformador rectificador. Éste dispositivo convierte la corriente alterna (suministrada desde una red o generador externo) a corriente continua de

menor voltaje, por medio de un transformador reductor y un puente rectificador, normalmente de tipo “seco” basado en elementos semiconductores (diodos de unión) de silicio, que exhiben muy baja resistencia al flujo de corriente en una dirección y una alta resistencia en la dirección opuesta.

El dispersor de corriente consiste en una batería de ánodos de composición y propiedades bien definidas, conectados en paralelo y dispuestos según una configuración particular en un lecho de mezcla despolarizante, de acuerdo con las características de la estructura a proteger.

La función de los distintos ánodos individuales (también llamados *electrodos*) conectados en el dispersor es otorgar una continuidad de material de sacrificio a lo largo de la masa compactada de coke, en cierto modo comparable al alma de los ánodos galvánicos de zinc y magnesio.

Las principales ventajas y limitaciones inherentes a la técnica de protección catódica por corriente impresa son las siguientes:

Ventajas:

- Parámetros de protección (potencial y corriente) elevados y regulables
- Flexibilidad en el control de la corriente drenada
- Su aplicación no se ve limitada por la resistividad del terreno
- Aplicable en cañerías desnudas o con revestimientos de alta o baja calidad
- Permite proteger estructuras muy extensas y/o de geometría compleja

Desventajas:

- Alto costo de instalación
- Alto costo de mantenimiento
- Requiere suministro de energía externa
- Puede ocasionar interferencias con estructuras o sistemas de protección externos

3.3.2 Procedimiento de cálculo

Para poder definir la magnitud de la corriente eléctrica a emplear para la protección catódica de una estructura, se necesita conocer el valor de resistencia a tierra que ofrece el revestimiento utilizado. En tal sentido, debemos recordar los siguientes principios básicos:

- La magnitud de la corriente que se utiliza para la protección catódica es una función directa del valor óhmico de la cobertura.
- La distribución de la corriente en una cañería es más eficiente cuando ésta se encuentra revestida que cuando se halla desnuda, es decir totalmente en contacto con el electrolito. Por lo tanto, la longitud protegida será mayor ya que dispondrá de un mayor alcance.

- Toda cobertura sufre un proceso de envejecimiento que hace que la resistencia a tierra disminuya, lo que hace necesario aumentar, con el tiempo la protección catódica a emplear y así mantener los potenciales eléctricos dentro de los valores vigentes.

Resistencia longitudinal de la cañería

Toda cañería revestida, ya sea enterrada o sumergida, posee características eléctricas específicas, las cuales pueden ser determinadas en campo por medio de una serie de mediciones sencillas.

La primera de ellas es la *resistencia longitudinal de la cañería* (R_L), definida como la resistencia eléctrica que ofrece la cañería a la circulación de la corriente, considerada como un conductor eléctrico. Las unidades usuales de medida son Ω/km y Ω/m . Su determinación se realiza mediante el llamado *método shunt* o “de envío de corriente”

Para su implementación, es necesario contar con una estación de medición como la representada en la Figura 3.3, la cual consta de una caja de medición de cuatro puntos, derivándose de ésta cuatro conductores hacia la cañería bajo análisis.

Considerando un tramo acotado de la misma, con una longitud de 60 a 100 metros, y haciendo circular a lo largo del mismo una corriente eléctrica de valor I_E mediante conexión de una fuente exterior y un reóstato entre los puntos E1 y E2, se mide la caída de potencial ΔV_C que la misma origina los puntos C1 y C2. El valor de R_L se obtiene entonces a partir de la Ley de Ohm:

$$[3.3] \quad R_L = \Delta V_C / (L \cdot I_E)$$

El uso de cuatro bornes (E1, C1, E2 y C2) se debe a la necesidad de evitar incorporar en la medida de R_L la resistencia de contacto cable-cañería en los puntos E1 y E2. Los valores de intensidad de corriente a ser aplicados se regulan mediante ajuste del reóstato, siendo normalmente especificados en los procedimientos o normas de aplicación, en función de las dimensiones de la cañería y la longitud del tramo ensayado.

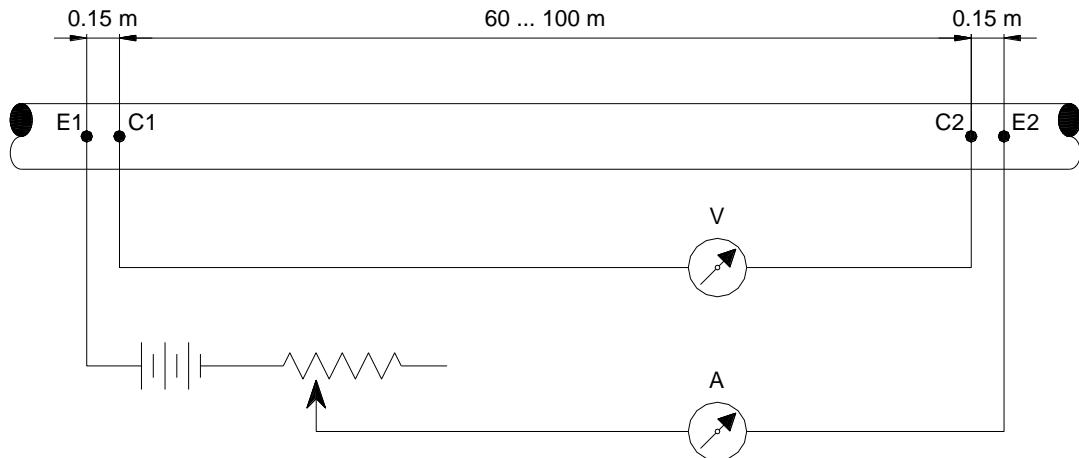


Figura 3.3: Método shunt para medición de la resistencia longitudinal

Un método alternativo para la determinación de la resistencia longitudinal, más sencillo pero también de menor precisión que el método shunt, es a través de un simple cálculo aritmético en función de la longitud del tramo de cañería considerado (L), su sección transversal (S) y la resistividad eléctrica específica del metal (r). En el caso del acero, éste último parámetro varía entre 0.18 y $0.22 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ a temperatura ambiente; para el cobre, su valor se reduce a $0.017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$).

Asumiendo que la cañería se comporta como un simple conductor eléctrico homogéneo y de dimensiones constantes conocidas, resulta:

$$[3.4] \quad R_L = r L / S$$

siendo:

$$[3.5] \quad S = \pi e D_M$$

$$[3.6] \quad D_M = (D_i + D_e) / 2$$

Donde D_M , D_i , D_e representan, respectivamente, los diámetros medio, interior y exterior de la sección transversal de la cañería, siendo e el espesor de pared.

El cálculo teórico (también conocido como “método clásico”) de la resistencia longitudinal resultará de utilidad a los efectos del diseño preliminar de un sistema de protección catódica por corriente impresa, destinado a una cañería que aún no ha sido instalada. Para estructuras existentes es más recomendable el método shunt, que también será de aplicación a los efectos de verificar y/o ajustar periódicamente los parámetros de salida de la fuente de corriente una vez instalada y en operación.

Resistencia específica y resistencia transversal de cobertura

Se define a la resistencia *específica de cobertura* (R_C) como la resistencia eléctrica que se opone al pasaje de corriente desde la superficie metálica de la estructura revestida hacia el medio electrolito o viceversa, a través de una sección plana de revestimiento, de medida unitaria (por ejemplo, 1 m² o 1 ft²). Las unidades de uso común para R_C serán Ω.m² u Ω.ft².

Se trata de un parámetro característico del revestimiento, siendo función tanto del material que lo constituye (su espesor y condición) como del medio con el cual se encuentra en contacto. Normalmente, los fabricantes proveen un valor de resistencia de cobertura correspondiente al revestimiento nuevo y aplicado de acuerdo a sus especificaciones (R_{C0}). Sin embargo, todo revestimiento sufre un proceso de degradación o “envejecimiento” a lo largo de su vida útil, determinado en gran parte por las condiciones de servicio de la cañería y la agresividad del entorno, lo cual se traduce en un decaimiento del valor de R_C a lo largo del tiempo. Además, la técnica y control de su aplicación (particularmente en el caso de revestimientos aplicados en campo) resulta fundamental para garantizar su integridad y, por lo tanto, un valor aceptable de R_C .

Cabe agregar que la resistencia efectiva de la cobertura depende no sólo del propio material de recubrimiento, sino también de la resistividad del terreno con el cual se encuentra en contacto; en efecto, a igualdad de otros parámetros, la circulación de corriente entre la superficie de la cañería y el medio externo será menor cuanto mayor sea la resistividad específica (ρ) de dicho medio, lo cual puede interpretarse como un incremento de R_C .

Todo ello deberá ser considerado por el proyectista, quien introducirá un factor de reducción por deterioro del revestimiento, lo suficientemente conservador como para considerar la situación esperada hacia el final de la vida útil proyectada para el sistema de protección catódica, generalmente de 10, 20 o 30 años. Es así que, a los efectos del diseño y dimensionamiento del sistema se considerará:

$$[3.7] \quad R_C = \beta R_{C0}$$

con $\beta = 0.3 \dots 0.5$

En la Tabla 3.4 se indican los valores mínimos requeridos por la Norma GE-N1-108 (Ref. [11]) para los distintos tipos de revestimiento considerados en la misma. Dichos valores pueden emplearse conservadoramente para estimar R_{C0} durante el diseño preliminar de un sistema de protección catódica, si no se dispone de datos más precisos suministrados por los fabricantes.

La Tabla 3.5 muestra valores típicos promediales de R_C para cañerías enterradas en suelos con una resistividad media $\rho = 1,000 \Omega.cm$.

Revestimiento	G	SG	R _{CO} mín Ω.m ²	e mín mm
Base asfáltica reforzado con lana de vidrio	A	-	10 ⁶	SC: 3.0 DC: 5.0
Laminados plásticos				1.5
Cintas de polietileno con envoltura exterior de refuerzo				2.0
Mastics asfálticos				SC: 3.0 DC: 5.0
Resinas epoxi	E	E1 – Resinas epoxi en polvo (FBE)	10 ⁸	SC: 0.35 DC: 0.50
		E2 – Resinas epoxi líquidas		
Cintas de petróleo	F	-	10 ⁶	2.0
Poliolefinas extruídas	G	G1 – Polietileno extruído. Sistema bicapa don adhesivos blandos tipo mastics	10 ⁸	(*)
		G2 – Polietileno extruído. Sistema bicapa don adhesivos blandos a base de compuestos butílicos		
		G3 – Polietileno extruído. Sistema bicapa don adhesivos duros		
		G4 – Polietileno extruído. Sistema tricapa		
		G5 – Polipropileno extruído. Sistema tricapa		
Poliolefinas termocontraíbles	H	H1 – Mantas y tubos de alta y baja relación de contracción	10 ⁸	TC: 1.0 AD: 1.0
		H2: Cintas termocontraíbles		
		H3: Cintas termocontraíbles de gran flexibilidad		
		H4: Piezas moldeadas termocontraíbles		

G = Grupo; SG = Subgrupo; e_{MIN} = Espesor mínimo total; SC = Simple cobertura; DC = Doble cobertura; TC: Capa externa termocontraible; AD: Adhesivo; (*) En función del diámetro nominal de la cañería y el tipo de revestimiento (estándar, reforzado, etc.) Ver Ref. [11]

Tabla 3.4: Espesores y resistencias de cobertura mínimas requeridos por la Norma GE-N1-108

Características de la Cañería	Condición del Revestimiento	Valor Promedio de R_c $\Omega \cdot m^2$
Cañerías de transporte extensas con pocos accesorios y derivaciones	Excelente	$> 10^4$
	Buena	$2 \times 10^3 \dots 10^4$
	Regular	$10^3 \dots 2 \times 10^3$
	Mala	$< 10^3$
	Cañería desnuda ($D_e = 2'' \dots 12''$)	5 ... 25
Cañerías de distribución con numerosos accesorios y/o derivaciones	Excelente	$> 2 \times 10^3$
	Buena	$10^3 \dots 2 \times 10^3$
	Regular	$2 \times 10^2 \dots 10^3$
	Mala	$< 2 \times 10^2$
	Cañería desnuda ($D_e = 2'' \dots 12''$)	5 ... 25

Tabla 3.5: Valores promediales típicos de R_c para cañerías enterradas en suelos con resistividad media $\rho = 1,000 \Omega \cdot cm$

A menudo se hace referencia a la llamada *resistencia transversal de cobertura* (R_T), definida como la resistencia eléctrica que opone el revestimiento al pasaje de electricidad, expresado por unidad de perímetro circunferencial de cañería revestida, es decir:

$$[3.8] \quad R_T = R_c / (\pi D_e)$$

Las unidades de R_T serán $\Omega \cdot m$. Conviene observar que la resistencia que opone una superficie de material de cobertura al pasaje de corriente eléctrica será directamente proporcional a R_T (o R_c) e inversamente proporcional a la medida de dicha superficie.

Atenuación del potencial cañería-suelo

La efectividad de un sistema de protección catódica depende básicamente de su capacidad para asegurar un potencial negativo (catódico) especificado en la estructura protegida, medido con respecto a un electrodo de referencia predefinido. Si su revestimiento externo fuese perfectamente dieléctrico y continuo, y se encontrara completamente aislada de cualquier otra estructura metálica, el consumo de corriente sería nulo y el valor de potencial se mantendría constante a lo largo de toda su superficie.

Sin embargo, sabemos esta situación ideal no es realizable en la práctica, y de hecho la existencia de imperfecciones en el revestimiento, su resistividad finita y el contacto con otras masas conductores, se traduce en un consumo de electricidad que circula, según se ilustra en la Figura [3.2], a lo largo de la cañería a medida que ingresa desde el terreno, hasta alcanzar el punto de conexión del conductor catódica. En estas condiciones, el potencial negativo de la cañería variará a lo largo de su traza, alcanzando un máximo (en valor absoluto) en el punto de drenaje y disminuyendo a medida que nos alejamos del mismo, hasta resultar insuficiente a los efectos de garantizar la protección anticorrosiva de la estructura, por tornarse inferior al valor mínimo especificado en el criterio de diseño adoptado.

A continuación veremos la serie de cálculos requeridos para determinar el perfil longitudinal de potenciales en una cañería, dato fundamental para dimensionar las unidades de corriente impresa del sistema y su distribución a lo largo de la traza. Para ello, definiremos un sistema de abscisas coaxial con la cañería, identificando como "O" el punto de conexión del conducto catódico (punto de drenaje de corriente) y como "X" a un punto genérico sobre la traza, ubicado a una distancia (x) del anterior.

Sean $I = I(x) = I_x$ la intensidad de corriente que circula a lo largo de la cañería, y $\Delta E = \Delta E(x) = \Delta E_x$ la diferencia de potencial entre la superficie de la cañería y el terreno (es decir, a través de su revestimiento) Obsérvese que para valores positivos de x , ambas variables serán normalmente negativas, puesto que la corriente circula hacia el punto de drenaje y el potencial cañería-suelo debe ser catódico (negativo) para brindar protección anticorrosiva.

Consideremos un tramo de cañería de longitud muy pequeña (dx) limitada por dos secciones transversales (normales a su eje) en los puntos X_1 y X_2 :

$$[3.9] \quad dx = x_2 - x_1$$

Las variaciones de I y ΔE entre dos secciones transversales consecutivas pueden determinarse por aplicación de la Ley de Ohm y conservación de la carga eléctrica. Sin embargo, dado que en principio ΔE e I no son constantes a lo largo de la traza de la cañería, estas relaciones deben aplicarse punto a punto, por lo cual resulta imprescindible la condición de que dx sea muy pequeño (en rigor, infinitesimal)

La pérdida de corriente (dI_x) a través del revestimiento será proporcional a la resistencia de cobertura:

$$[3.10] \quad dI_x = (\pi D_e dx \Delta E_x) / R_c = (dx \Delta E_x) / R_T$$

Por otra parte, la variación de ΔE entre las dos secciones transversales consideradas será proporcional a la resistencia longitudinal de la cañería:

$$[3.11] \quad d(\Delta E_x) = I_x R_L$$

Integrando las Ecuaciones [3.10] y [3.11] entre el punto de drenaje (O) y un punto genérico de la traza (X) obtendremos:

$$[3.12] \quad (\Delta E_x)^2 = (\Delta E_0)^2 + R_k^2(I_x^2 - I_0^2)$$

$$[3.13] \quad (R_k I_x + |\Delta E_x|) / (R_k I_0 + |\Delta E_0|) = e^{-\gamma(x-x_0)}$$

Donde R_k se define como la *resistencia equivalente* del circuito cañería-cobertura y γ es la llamada *constante de atenuación*:

$$[3.14] \quad R_k = (R_L R_T)^{1/2}$$

$$[3.15] \gamma = (R_L/R_T)^{1/2}$$

Puesto que las unidades usuales de R_L son Ω/m y las de R_T son $\Omega.m$, R_k y γ se expresarán respectivamente en Ω y m^{-1} .

Introduciendo algunas hipótesis simplificadoras razonables, las ecuaciones [3.12] y [3.13] pueden ser desacopladas y permiten determinar el alcance de la protección catódica por corriente impresa; en efecto, si $|\Delta E_m|$ es el valor mínimo de potencial (en valor absoluto) requerido para asegurar una protección anticorrosiva efectiva, y asumiendo que $I_L = 0$ [17] los tramos de cañería protegidos a ambos lados del punto de drenaje tendrán una longitud máxima L_P dada por:

$$[3.16] L_P = \gamma^{-1} \operatorname{argch}(\Delta E_0 / \Delta E_m)$$

El *potencial de envío* (ΔE_0), es decir, el potencial impuesto en el punto de drenaje, deberá estar limitado por el valor máximo admitido (ΔE_M) para evitar la sobre-protección de la cañería en sus inmediaciones y los efectos perniciosos que ello puede provocar en la integridad del revestimiento (despegue catódico):

$$[3.17] |\Delta E_0| < |\Delta E_M|$$

Otro parámetro de gran importancia tanto para el dimensionamiento de las fuentes de corriente como para realizar la evaluación económica del sistema de protección catódica, lo constituye el consumo de corriente en el punto de drenaje (I_0). Su valor se calcula fácilmente combinando las Ecuaciones [3.12] y [3.13], e integrando a lo largo de la longitud máxima de alcance (L_P), según [3.16]:

$$[3.18] I_0 = - (\Delta E_m^2 - \Delta E_0^2)^{1/2} / R_k$$

El cálculo de la capacidad y potencia requerida para las fuentes de protección catódica (ΔE_s) debe incorporar todos las resistencias y caídas de potencial presentes en el circuito de la corriente de protección. Ello incluye las pérdidas a lo largo de los conductores anódico y catódico (R_w), la resistencia introducida por el dispersor (R_D), y la contra-fem generada como consecuencia de la impedancia asociada al circuito dispersor – cañería (ΔE_{BF}):

$$[3.19] |\Delta E_s| = |I_0| (R_w + R_D) + |\Delta E_0 - \Delta E_m| + \Delta E_{BF}$$

Un valor estimativo usualmente empleado en cañerías simples (es decir, no ramificadas) para la contra-fem del circuito es $\Delta E_{BF} = 2.0$ V. R_w deberá calcularse en cada caso de acuerdo a la longitud y sección de los cables utilizados. Por último, la resistencia del dispersor depende de su diseño y disposición, existiendo fórmulas de cálculo semi-empíricas para cada caso en particular (ver Ref. [1])

3.3.3 Tipos de dispersores

A continuación, se detallan las variantes más utilizadas para implementar un sistema de protección catódica por corriente impresa, particularmente en lo que concierne al diseño y construcción del dispersor.

Dispersores con relleno arcilloso y ánodos de caño rezago

Son de instalación superficial en configuración horizontal o vertical (ver Sección 3.3.4)

Consiste en caños de acero de descarte, soldados en una o varias tiras y depositados en un lecho de arcilla y sal con el agregado de agua en cantidad suficiente como para saturar el material adyacente a los ánodos.

Periódicamente, con mayor frecuencia en las épocas de sequía, se debe proceder a humectar el dispersor a fin de conservar la humedad del suelo. Esto se hace por medio de bocas de humectación instaladas para tal propósito.

El ánodo dispersor se proyecta normalmente para una vida útil de 10 años. En el caso de emplear caños de acero para su construcción, la cantidad en peso del caño a instalar se calcula de la siguiente forma:

$$[3.20] \quad W = 10 \times I \times L$$

Donde W representa el peso total de caño de sacrificio expresado en Kg; I representa la corriente de drenaje en A; y L la vida útil del dispersor, en años. La Ecuación [3.19] indica que el acero se consume a razón de 10 Kg/(A-año), de acuerdo a lo observado en la Sección 1.5. De esta manera, si se pretende una vida útil de 10 años, y si la cantidad de corriente de drenaje necesaria para proteger la estructura es, por ejemplo, de 40 A, el valor de W será:

$$[3.21] \quad W = 10 \text{ Kg}/(\text{A-año}) \times 40 \text{ A} \times 10 \text{ años} = 4,000 \text{ Kg}$$

Es decir, sería necesario instalar caños en cantidad suficiente como para sumar un total de 4,000 Kg

Preferentemente se utilizará caño rezago de diámetro superior a 6", puesto que poseen mayor superficie de contacto con el terreno a la vez que se limitan las posibilidades de interferencia en la dispersión de la corriente.

Volviendo al ejemplo mencionado, si la cañería rezago de la que se dispone tuviera un diámetro de 8" y un espesor de pared de 8,18 mm, su peso lineal será aproximadamente de 40 Kg/m, o sea que se necesitarían 100 metros de longitud para reunir los 4,000 kilogramos requeridos.

Los métodos de soldadura del cable anódico a los dispersores de este tipo, lo mismo que la disposición de los caños dentro de la excavación efectuada, se encuentran ampliamente especificados y consta en los planos típicos de instalación.

No obstante, se puede acotar que el cable anódico debe tener varios puntos de contacto a lo largo de la tira de caño del dispersor para asegurar la continuidad en el caso de cercenarse la cañería debido a condiciones de corrosión violenta.

Dispersores con relleno de coke y ánodos de grafito

Los ánodos de grafito consisten en barras cilíndricas de 3" con una longitud de 1 o 1,50 m

Se instalan superficialmente y dispuestos en posición rigurosamente vertical, rodeados de coke metalúrgico en hoyos de 16" y conservando una separación mínima de 6 m entre electrodos para evitar efectos de interferencia en la dispersión de corriente.

El coke debe ser compactado a conciencia mediante el agregado de agua y el empleo de pisones apropiados. Este apisonamiento se debe realizar por capas. Se logra mejorar la función desempeñada por el relleno de coke agregando hasta un 30% de grafito en polvo, con lo cual se obtiene una mayor conductividad.

Cada ánodo enterrado debe contar con una cañería de ventilación a los efectos de disipar el calor y los gases formados por las reacciones anódicas. A su vez, estas cañerías permiten la humectación periódica de los ánodos.

Cada ánodo de coke con electrodo de grafito, tiene una capacidad teórica de drenaje 4 A, pero que en la práctica se ve limitada por la formación excesiva de gases y el calentamiento producido, por lo cual se emplea un coeficiente de rendimiento de 0.5. De esta manera, para lograr una corriente de drenaje de 40 amperes, se instalan 20 ánodos en la forma mencionada.

Dispersores con relleno de coke y ánodos de hierro silicio

Consisten en barras cilíndricas de 1,50 m de longitud por 2" de diámetro que se instalan rodeadas con un relleno de coke metalúrgico con agregado de grafito en polvo para mejorar su conductividad. Para su fabricación, se emplea fundición de hierro con alto porcentaje de silicio (14%) Ello le confiere una gran resistencia a la corrosión aunque su capacidad de drenaje está limitada a 2 A por ánodo.

Se emplean en dispersores tanto superficiales como de profundidad (ver Sección 3.3.4), particularmente en instalaciones marinas y costeras (cañerías submarinas, acometidas costeras, cruces subfluviales)

Dispersores con relleno de coke y ánodos de acero

En este caso, los ánodos consisten en caños de acero de 6" de diámetro por 1,50 m de longitud que pueden instalarse verticalmente en hoyos de 16" con relleno de coke metalúrgico, o bien, en forma horizontal alineados en una zanja única sobre lecho de coke.

La gran ventaja de este tipo de ánodos reside en su reducido costo con respecto a los de grafito o hierro al silicio, además de poseer una elevada capacidad de corriente de drenaje, alcanzando hasta 5 A por unidad.

También en este caso se requiere una ventilación adecuada para la evacuación de los gases formados. Para asegurar un buen contacto eléctrico con el coke conviene arenar la superficie exterior de los caños de acero.

Dispersores con ánodos a base de titanio

El ánodo conocido como "*Mixed Metal Oxide*" está compuesto por un tubo cuyo sustrato es de Titanio y se halla recubierto por una capa de óxidos de metales nobles tales como el Iridio, Tantalio, Niobio y otros.

Las longitudes varían entre 1 y 1,50 m; para esta última medida, el peso del ánodo es de 1,35 Kg y su diámetro es de 1". Su vida útil está diseñada para 20 años, cuando el consumo de corriente por ánodo no excede los 5 A.

Estos ánodos suelen utilizarse en la instalación de dispersores de profundidad, con relleno formulado a base de coke metalúrgico y grafito.

Dispersores continuos

Se fabrican en forma de cables flexibles armados, con diámetros del orden de 1" a 2" y constan de un alma central (cable de acero trenzado) rodeada de un material conductor que constituye el ánodo propiamente dicho, que puede ser de naturaleza polimérica, del tipo *Mixed Metal Oxide*, aleaciones de platino / niobio, etc. Incorporan un relleno anular de coke y varias capas externas de revestimiento protector en forma de tejidos sintéticos resistentes a la agresividad química del terreno y a los esfuerzos mecánicos. La capacidad máxima de drenaje de corriente se encuentra en el orden de los 50 mA/m

Se instalan paralelamente y a la misma profundidad que la cañería a proteger, en la misma zanja o en una excavada específicamente para tal propósito, debiendo conservarse una distancia de separación especificada por el fabricante. Si bien se trata de una estructura flexible, los radios mínimos de curvatura durante su instalación deben limitarse a 0.5 m. No requiere el agregado de un relleno despolarizante ya que el mismo viene incorporado en el propio dispersor, tal como se indicó antes.

Son aplicables no sólo en la protección de cañería enterradas, sino también para prevenir la corrosión en la base de tanques y depósitos metálicos

apoyados o semi-enterrados en el terreno. En este caso, se instalan previamente a la construcción del recipiente, adoptando una configuración espiral concéntrica con su base, o bien, en forma de anillo circular rodeando su perímetro.

A menudo, son empleados para reforzar o complementar un sistema de protección catódica pre-existente, aplicándolo a lo largo de aquellos sectores en los cuales por alguna causa el nivel de protección es insuficiente. Brindan, por lo tanto, una importante versatilidad para el control de la corrosión en estructuras con revestimientos envejecidos o deteriorados y en sectores particularmente problemáticos por razones ambientales, interferencia, etc.

3.3.4 Recomendaciones para la instalación de dispersores

El dispersor debe instalarse, dentro de la zona elegida, en el punto de mínima resistividad del terreno. A su vez, la resistividad se determina a distintas profundidades, cada uno o dos metros, lo que arrojará como resultado la profundidad a la que se emplazará el dispersor. La distancia de separación con respecto a la cañería dependerá del propio diseño del sistema de protección catódica, de las características del terreno y de la longitud del tramo de cañería a proteger. En el caso de dispersores de superficie, esta distancia no será inferior a los 80 metros, mientras que el uso de ánodos de dispersión profundos permite reducirla a unos pocos metros.

Los dispersores superficiales pueden instalarse en zonas rurales, no recomendándose su uso para zonas urbanas por la mayor probabilidad de interferencia con otras estructuras enterradas; en todo caso, se deberá contemplar que su operación no ponga en peligro cualquier instalación metálica que se interponga en el camino de retorno de la corriente de protección.

La profundidad de instalación será similar o ligeramente superior a la de la estructura que se pretende proteger. Los ánodos se disponen en un lecho o pileta de coque metalúrgico, eventualmente enriquecido con grafito en polvo, y se conectan en paralelo a través de una caja de medición de potenciales en superficie. Por encima del relleno de coque, y hasta alcanzar el nivel original del terreno, se completa la tapada con una capa de grava o piedra partida, a fin de facilitar la humectación del lecho y la evacuación de los gases generados. De todos modos, siempre es recomendable instalar una cañería de cemento o PVC de diámetro no inferior a 100 mm, abierta en ambos extremos, a través de la tapada hasta las inmediaciones del lecho para complementar estas funciones.

Los dispersores de profundidad se emplean cuando no se cuenta con terreno disponible para emplazamientos superficiales, vale decir donde no pueden conservarse distancias mínimas del orden de 80 metros entre el dispersor y la estructura a proteger. También puede optarse por este tipo de instalación en caso que el emplazamiento de dispersores superficiales pueda interferir con otras estructuras metálicas enterradas.

El dispersor de profundidad consta de una batería de ánodos inmersos en una columna de relleno con una longitud de varias decenas de metros, conectados en paralelo e individualmente desde una caja de conexión en superficie, a menudo dispuestos en torno a una tubería de PVC micro-perforada y abierta por ambos extremos para permitir la evacuación de gases y el equilibrio de presiones hidrostáticas de las napas de agua atravesadas por la columna.

Su construcción exige una planificación y control muy cuidadosos para garantizar el correcto funcionamiento del dispersor, lo cual incluye una serie de estudios geo-morfológicos, extracción de muestras de profundidad y elaboración de perfiles horizontales y verticales de resistividad y acidez del terreno, evaluación de la presencia de contaminantes o sustancias agresivas en el suelo, etc.

Durante los trabajos de instalación, es fundamental asegurar un llenado homogéneo y continuo de la columna de relleno, evitando la formación de cavidades o discontinuidades; para ello, es común inyectar el material fluidificado, previa emulsión del grafito, a través del ducto central de venteo, llenando el espacio anular externo en sentido ascendente.

El procedimiento de perforación para la construcción de un dispersor profundo puede requerir que se proceda a encamisar y sellar anularmente con hormigón ciertos tramos de la columna, particularmente los primeros 10 a 20 metros o hasta alcanzar el primer estrato impermeable, a fin de prevenir la contaminación de napas inferiores de agua por mezcla con líquidos o material contaminado próximo a la superficie.

El diseño de un dispersor profundo puede especificarse para facilitar la recuperación y reemplazo de los ánodos, aunque ello trae aparejado generalmente una mayor complejidad y costos adicionales con respecto a la opción de trabajar a “pozo perdido”.

En efecto, si se diseña un dispersor recuperable, deberá utilizarse un carbón con granulometría esférica para la elaboración del relleno, lo cual permite separar y remover el relleno por inyección de agua a presión, posibilitando recuperar y sustituir los ánodos deteriorados.

Por el contrario, si se opta por un dispersor “a pozo perdido” se podrá utilizar un carbón de costo inferior, pero cuya granulometría será irregular. Esto implicará que a poco de efectuarse la instalación el material de relleno se compactará de tal forma que este permanecerá inalterable hasta el fin de su vida útil. El principal inconveniente radica en que, si la medición de corriente drenada que se efectúa desde la caja de conexión en superficie indica que uno o más de los ánodos no está operando correctamente, no será posible reparar la falla pues no podrá procederse a su extracción.

La Ref. [26] facilita mayor información sobre el diseño y operación de los dispersores de instalación profunda, por lo cual recomendamos al lector interesado remitirse a su lectura.

3.4 Elementos de aislación eléctrica

Cuando se protege catódicamente una estructura metálica puede resultar necesario interrumpir su continuidad eléctrica, a fin de asegurar la sectorización del sistema de protección y la separación eléctrica con respecto a otras estructuras o secciones contiguas con requerimientos diferentes de protección (ver Ref. [27])

Ello se implementa instalando *juntas de aislación* en puntos pre-definidos de la estructura, con su correspondiente caja y conexión de continuidad. Ello permitirá interrumpir a voluntad el pasaje de la corriente de protección catódica y poder estudiar y solucionar los problemas que afectan a un tramo específico de la instalación.

Una junta de aislación está compuesta básicamente por un material dieléctrico que, interpuesto entre dos metales, impide el contacto eléctrico entre los mismos.

Las más comunes y sencillas de instalar son las del tipo bridado, consistentes en una junta de micarta interpuesta entre dos bridas abulonadas. A fin de evitar el cortocircuito de la junta a través de los bulones, los mismos se recubren de un material dieléctrico y/o tubos aislantes. También suelen emplearse arandelas aislantes para separar las tuercas de la cara exterior de las bridas.

Generalmente se intercalan sendos elementos de separación entre la junta y las caras internas de las bridas, a fin de lograr un efecto superior de “amarre” y asegurar la hermeticidad de la unión. Sin embargo, estos elementos, conocidos vulgarmente como “klinger” (por generalización de una conocida marca comercial) pueden originar inconvenientes durante su instalación, ya que muchas veces incorporan una malla de alambre que, durante el ajuste a golpe de los espárragos de la brida, pueden ponerse en contacto con los de la plancha opuesta y cortocircuitar la junta.

Luego de instalada la junta, los tubos y arandelas aislantes, y tras ajustar los espárragos, debe tomarse la precaución de llenar el espacio anular entre ambas bridas con algún material plástico sellante, tal como siliconas, masilla, mástic, etc. a fin de imposibilitar el ingreso de humedad o partículas extrañas que pudieran dañar la calidad de la aislación.

Posteriormente se colocará sobre los labios de las bridas y el espacio entre éstos un laminado plástico de color rojo, el cual tendrá dos objetivos: identificar la existencia de una junta aislante y asegurar la estanqueidad del espacio anular entre bridas.

La sencillez de instalación y el bajo costo han generalizado el uso de este tipo de juntas aislantes, sin embargo requieren un control cuidadoso durante su vida útil puesto que representan potenciales puntos de fuga de gas por agrietamiento del material fenólico. Desde este punto de vista, y también con respecto a su función como elementos de aislación eléctrica, son menos

confiables que otras soluciones de desarrollo más reciente, tales como las *juntas monolíticas*.

Estas últimas ofrecen mayores garantías de seguridad y confiabilidad, a costa de un mayor precio. Se trata de elementos compactos que incorporan un material dieléctrico (por ejemplo, policarbonato reforzado con vidrio, epoxídico estratificado con fibra de vidrio, etc.) y sellos anulares elastoméricos para prevenir el ingreso de humedad. Los anillos dieléctricos y sellantes se encapsulan y disponen laberínticamente en un cuerpo de acero, provisto de conexiones de diámetro coincidente con el de la cañería, en la cual se intercalan soldadas.

El punto de emplazamiento debe ser cuidadosamente seleccionado a fin de evitar que la junta se vea sometida a esfuerzos excesivos de flexión o corte o, ya sea por desalineación relativa entre los tramos contiguos de la cañería, o bien, por dilataciones de origen térmico, vibraciones, etc.

En función de su elevado costo y el hecho de que, en caso de falla, deberá cortarse la cañería para proceder a su reemplazo, es altamente recomendable instalar celdas descargadoras de sobre-tensiones a ambos lados de la junta, a fin de evitar que una eventual corriente de falla que pudiera ingresar y circular a lo largo de la cañería (por ejemplo, asociada a inducciones electromagnéticas, descargas atmosféricas, etc.) provocara su destrucción.

En el caso de cañerías menores, tales como servicios domiciliarios e industriales, suelen emplearse *cuplas* y *uniones dobles* roscadas de material plástico o fenólico, las cuales ofrecen las ventajas de ser económicas, eficientes y prácticamente no requerir mantenimiento. Sin embargo, su uso se restringe a cañerías de diámetro reducido y baja presión.

3.4.1 Puntos de separación eléctrica

Los elementos de separación se instalarán, típicamente, en los puntos de conexión con instalaciones de superficie, válvulas de línea, derivaciones, cruces subfluviales, límites jurisdiccionales o cambios de propietario u operador del sistema, etc. Veamos algunos ejemplos:

Sectores aéreos y enterrados

Los tramos aéreos no comparten un medio electrolito común con la cañería enterrada. A igualdad de otros parámetros, un tramo aéreo podrá comportarse catódicamente con respecto a las secciones adyacentes enterradas, por formación de una celda de aireación diferencial. Las técnicas convencionales de protección catódica para estructuras enterradas no son de aplicación directa, dado que la atmósfera se comportará como un medio dieléctrico impidiendo o limitando la circulación de la corriente de protección catódica. Sin embargo, por esta misma razón, en condiciones normales exhibirá un grado de agresividad mucho menor desde el punto de vista del

ataque corrosivo, en comparación con el suelo húmedo o los ambientes acuosos.

Por otra parte, los mecanismos de degradación corrosiva a los que están sometidas las instalaciones de superficie difieren sustancialmente de aquellos correspondientes a las estructuras enterradas o sumergidas, siendo de particular relevancia la corrosión atmosférica, en combinación con otros problemas específicos al ambiente o la función que cumplen dichas instalaciones (por ejemplo, manejo de sustancias corrosivas, temperaturas alejadas de la ambiente, esfuerzos de fatiga, etc.) En términos generales, los métodos de protección anticorrosiva en las estructuras metálicas de superficie estarán basados en técnicas pasivas, mediante la aplicación de revestimientos protectores y esquemas de pintura, según lo indicado en el Capítulo 2.

En la mayoría de los casos las estructuras metálicas de superficie contarán, por razones operativas y de seguridad, con una instalación de puesta a tierra; de no aislarse eléctricamente, redundaría en una disminución de la protección catódica aplicada y/o un sobre-consumo de corriente puesto que dicha conexión se comportaría como una sección de cañería enterrada y desprovista de revestimiento.

Lo anterior es aplicable en los puntos de conexión de una cañería enterrada con cualquier tipo de instalación de superficie, tales como estaciones de compresión, regulación o medición, válvulas aéreas, tanques de almacenamiento o proceso, etc.

Derivaciones

Normalmente es recomendable instalar juntas de aislación eléctrica en los puntos de conexión de una cañería de derivación (ramales, laterales, etc.) con el troncal de origen.

Ello posibilitará adecuar las necesidades de protección catódica al ramal en cuestión y brindará una mayor versatilidad para la operación y solución de problemas que puedan surgir en el sistema de protección catódica. De este modo, será posible especificar los métodos de protección catódica más adecuados para cada tramo en particular (sistemas galvánicos distribuidos o concentrados, sistemas o de corriente impresa con dispersores profundos o de superficie, etc.) y ajustar las variables de funcionamiento independientemente en cada sistema (potenciales de protección, corriente de drenaje, densidad superficial de corriente, potencia suministrada por las unidades de corriente impresa, etc.)

En efecto, los parámetros de diseño y operación del sistema dependerán fuertemente de las características de la cañería que se pretende proteger y en general éstas diferirán sustancialmente entre un troncal y una derivación. Algunos de los factores más relevantes que podemos mencionar desde este punto de vista son:

- Tipo de revestimiento anticorrosivo

- Material de la cañería
- Diámetro, longitud y espesor de pared.
- Presión, temperatura y caudales de operación.
- Tipo de terreno, material y profundidad de tapada.
- Agresividad del medio; resistividad, acidez, presencia de contaminantes, actividad bacteriana, etc.
- Clase de trazado: zonas rurales, sub-urbanas y urbanas; densidad de servicios enterrados y probabilidad de interferencias con otras estructuras subterráneas y sistemas de protección catódica; disponibilidad del espacio mínimo requerido para la instalación de baterías de ánodos o dispersores; reglamentaciones municipales, etc.
- Criticidad de la cañería: en general los requerimientos de diseño y control del sistema de protección anticorrosiva serán superiores en las cañerías troncales o de mayor importancia estratégica en una red de transporte o distribución.
- Disponibilidad de fuentes de energía eléctrica.
- Accesibilidad de la traza.

En función de lo anterior, es práctica común en la prestación del suministro de gas a una industria o a un cliente residencial, aislar el correspondiente troncal, ramal o red de la instalación receptora. Análogamente, los gasoductos laterales se aíslan en su unión con el troncal, ubicando las juntas correspondientes en la cámara de regulación y en el suministro.

Cada aislación eléctrica (a excepción de las ubicadas en los servicios domiciliarios y/o industriales) debe contar con una caja de continuidad que en caso de necesidad o conveniencia permita cortocircuitar la junta por medio de cables de cobre con una sección mínima de 10 mm^2 , soldados por medio de unión cupro-alumino térmica a ambos lados de la misma. Del mismo modo, se conectarán sendos cables a la cañería, por lo menos de 4 mm^2 de sección, accesibles desde bornes ubicados en la misma caja de continuidad para permitir efectuar mediciones de potencial aguas arriba y abajo de la junta, así como realizar ensayos de integridad del dieléctrico.

En los servicios industriales, se ubicarán cajas de continuidad en las inmediaciones de las juntas aislantes, a fin de comprobar su efectividad.

3.5 Criterios de protección catódica

3.5.1 Definición

A continuación, analizaremos los criterios adoptados por diversos estándares técnicos internacionales para asegurar la efectividad de un sistema de protección catódica aplicado a una cañería enterrada o sumergida, así como las técnicas de medición correspondientes; su aplicación deberá ajustarse a lo indicado en cada caso.

En particular, nos referiremos a la Normas N.A.G. – 100 (Ref. [8]) que en su Apéndice D [18] incorpora una serie de definiciones y requerimientos relativos al monitoreo y validación de sistemas de protección catódica en gasoductos enterrados o sumergidos. La pertinencia de dicha referencia es doble: por un lado, en términos generales las N.A.G. – 100 recoge la experiencia y criterios compartidos por muchos otros estándares de aplicación internacional, especialmente de origen americano..

Según se establece en el Referido Apéndice – D de las N.A.G. - 100, tres son los criterios reconocidos por dicho estándar para validar un sistema de protección catódica (es decir, demostrar su efectividad):

- 1.1 *Un potencial negativo (catódico) de por lo menos 850 mV, con la protección catódica aplicada. Este potencial está referido a un electrodo de Cu/SO₄Cu saturado. Las caídas de tensión distintas de las producidas en la interfase estructura-electrolito, deben ser determinadas para la interpretación válida de este criterio.*

Nota: *Dichas caídas serán determinadas por alguno de los siguientes métodos:*

- 1.1.1 *por medición o cálculo.*
 - 1.1.2 *por revisión del comportamiento histórico del sistema de protección catódica.*
 - 1.1.3 *por evaluación de las características físicas y eléctricas de la cañería y su entorno.*
 - 1.1.4 *por determinación de evidencias físicas de corrosión.*
- 1.2 *Un potencial negativo de polarización de por lo menos 850 mV con respecto a un electrodo de referencia de Cu/SO₄Cu saturado.*

La medición de este potencial se hará sin la aplicación de la corriente de protección (para el caso de existir el aporte de más de una fuente, se deberán interrumpir las mismas simultáneamente y en forma periódica)

- 1.3 *Un mínimo de 100 mV de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. La formación o decaimiento de la polarización puede ser medido para satisfacer este criterio.*

Adicionalmente, se reconoce la existencia de ciertas condiciones especiales bajo las cuales los criterios arriba definidos no bastarían, por sí solos, para garantizar una adecuada protección anticorrosiva, introduciendo en tales casos algunos requisitos adicionales:

En algunas situaciones, tales como presencia de sulfhídricos, bacterias, elevadas temperaturas, medios ácidos y materiales disímiles, los criterios indicados pueden no ser suficientes, por lo tanto para:

- en caso de operarse con altas temperaturas, los valores fijados deberán incrementarse en 3 mV/C° a partir de 25° C (temperatura de la estructura)
- en caso de presencia bacteriana, los valores indicados se incrementarán en 100 mV .

3.5.2 Interpretación de lo establecido en las Normas N.A.G.-100

Al decir que los criterios de protección catódica y la metodología a emplear se aplican sobre las estructuras de acero y fundición, debemos asumir que las tuberías de fundición se hallan exentas de la aplicación de la protección catódica. Por ello en adelante sólo nos referiremos a la protección de los conductos de acero.

Primeramente corresponde señalar que el cumplimiento de lo establecido en las Normas N.A.G. – 100 en cuanto a la validación de un sistema de protección catódica, se garantiza satisfaciendo al menos uno de los criterios contenidos en el Apéndice D. El orden que se le ha dado en el texto de la Norma a cada uno de ellos no se traduce en su respectiva calidad o idoneidad de aplicación. De hecho, cada uno de los criterios definidos resulta por sí solo válido para su aplicación. Si existiera una oposición a este concepto la propia Norma lo aclararía.

Interpretamos entonces que la satisfacción de uno de los criterios conlleva el cumplimiento de la propia Norma. Además, ningún criterio debería considerarse como más exigente o más permisivo que los otros. De lo contrario, en el Apéndice D se indicaría qué criterio utilizar bajo ciertas circunstancias y cuál otro en casos distintos.

El texto del Apéndice D es suficientemente claro y explícito, dejando librado a la decisión del Operador Técnico del sistema, y bajo su responsabilidad, la adopción del criterio que considere más adecuado en cada caso.

3.6 Métodos para la medición de potenciales eléctricos

El criterio de validación utilizado durante más de medio siglo y que continúa aún en vigencia en muchos lugares se basa en la medición de *potenciales ON*, esto es, con el sistema de protección catódica conectado y drenando corriente de la estructura protegida [7]

No obstante, se ha descubierto que esta medición está enmascarada por las caídas de potencial de origen óhmico (a veces llamadas “caídas IxR ”) asociadas a la circulación de la corriente de protección a través del terreno hacia la superficie de la cañería. Si bien el error puede minimizarse posicionando el electrodo de referencia lo más cerca posible de la superficie de la cañería (esto es, alineado verticalmente sobre su traza) nunca se elimina

totalmente ni tampoco es sencillo determinarlo dado que depende de la intensidad del flujo de corriente (es decir, de la densidad superficial de corriente, por lo tanto de la condición del propio revestimiento de la cañería) y de la resistividad del terreno, parámetros difícilmente conocidos o estimados en la práctica.

No obstante ello, el Apéndice D de la Norma NAG-100 incorpora el criterio denominado “-850 mV ON”, pero descontando la caída óhmica IxR , dejando librado al Operador la determinación de las magnitudes requeridas para su cálculo. Debe observarse que el error introducido por este concepto es aditivo (en valor absoluto) a la lectura obtenida, siendo imposible conocer en forma directa qué porcentaje corresponde a la protección efectiva. Ello invalida, desde el punto de vista cuantitativo, la aplicación exclusiva de la medida de potenciales ON para inferir el nivel de protección catódica en una estructura enterrada o sumergida.

Una alternativa comúnmente utilizada para eliminar el error óhmico es la determinación de los potenciales OFF^[7] para lo cual se desconectan simultáneamente y durante períodos de tiempo muy cortos (del orden de segundos) todas las fuentes de energía del sistema de protección catódica; de este modo, al interrumpirse el flujo de corriente de protección, se anulará el producto IxR . El criterio referido como “-850 mV OFF” será satisfecho cuando, al interrumpir la corriente de protección, se obtenga un potencial de -850 mV o más negativo.

Por último, el Apéndice D prevé un tercer criterio, “100 mV de polarización” basado en la medición del *potencial natural* o *estático* de la cañería. Su obtención se logra dejando “caer” al sistema, es decir, sacando de servicio todas las fuentes de energía conectadas a la estructura por un período de tiempo relativamente prolongado, por ejemplo del orden de 5 a 10 días, aunque su extensión exacta dependerá de las características particulares de cada cañería o red.

La diferencia entre el valor OFF y el potencial natural deberá superar los 100 mV para satisfacer este criterio.

La necesidad de desconectar el sistema (y, por lo tanto, dejar a la cañería desprotegida) durante un período significativo para determinar el potencial natural, unido a las facilidades incorporadas en los equipos modernos de corriente impresa para la medición de potenciales OFF, hace que en general se prefiera la aplicación de este criterio en primera instancia, recurriendo al de 100 mv de polarización sólo en aquellos casos donde no se verifica el anterior.

A continuación se explicará una posible metodología para la medición de potenciales ON-OFF y naturales. Si bien haremos referencia específicamente a su implementación en sistemas de protección catódica por corriente impresa, debe quedar claro que también es perfectamente posible determinar estos parámetros en estructuras protegidas por medio de sistemas galvánicos.

Para ello, es necesario instalar coupones de corrosión vinculados a la estructura y a los ánodos de sacrificio a través de interruptores centralizados en las estaciones de medición de potenciales. La Ref. [30] proporciona información detallada al respecto.

3.6.1 Método de medición ON-OFF

Este método permite determinar los valores de potencial ON y OFF en cada punto de la cañería en la cual se cuente con una estación de medición de potenciales con un conductor soldado a la superficie metálica. Requiere la instalación de un elemento de estado sólido denominado *interruptor sincronizable ON – OFF* en cada fuente de corriente impresa conectado al tramo de cañería o sector de la red que se desea evaluar.

El circuito del interruptor sincronizable opera en función de una base de tiempo controlada por un cristal oscilador de cuarzo tipo PIERCE a tiempo exacto deseado, con errores típicamente inferiores a 2 partes por millón.

La división de la frecuencia de oscilación del cristal se efectúa tanto para la selección de tiempo “ON” como para la del tiempo “OFF”. La operación de conexión (ON) y desconexión (OFF) alternada de la fuente de corriente impresa se denomina *ciclaje*. La capacidad de interrupción del interruptor sincronizable varía según los modelos, siendo normalmente de 60 a 100 A.

Los equipos comúnmente utilizados en sistemas de protección catódica alimentados con transfo-rectificadores ofrecen una autonomía aproximada de 30 horas por la capacidad de su batería interna de 12V – 3 A-hr, con un cargador que restablece su carga máxima en 10 horas. Para el caso de tiempos de uso sincrónico en campo durante más de un día de operación, se puede recurrir a la conexión del cargador interno del interruptor, a la toma de alimentación de 220 V de la fuente, preservando la carga de la batería solamente para los casos de corte de energía.

A los efectos de ciclar sincronizadamente todas las fuentes conectadas, se recurre a una *unidad auxiliar de sincronización*. Esta posee una configuración interna similar a la de los interruptores, con la excepción de la etapa MOSFET que no es utilizada. Los terminales, que son normalmente entradas de sincronismo, se direccionan como salida conectándose en paralelo con todas las otras entradas.

De esta forma, ante la presencia de un pulso de sincronismo, se “reenganchan” los osciladores internos de todos los sincronizadores, comenzando a su vez por el mismo ciclo y en perfecta fase.

Debe tenerse especial cuidado en comprobar que los tiempos “ON” y “OFF” definidos coincidan respectivamente en todos los equipos. Además, en caso de utilizar períodos de ciclaje de más de 24 horas, se deberá recurrir al uso de la unidad de sincronización auxiliar para poder re-sincronizar diariamente los equipos sin desinstalarlos, ya que por cada ciclo completo ON-

OFF, dicha unidad genera un pulso de muy corta duración que posibilita la puesta en fase.

En general, es recomendable que la duración del tiempo OFF (interrupción de la corriente) sea inferior a 1/3 del tiempo ON de conexión, a fin de evitar que la estructura pierda su polarización durante el ciclaje. Por ejemplo, puede definirse un ciclo ON-OFF de 10 segundos, de modo que en cada ciclo las fuentes estén conectadas durante 8 segundos y desconectadas durante 2 segundos (relación 4 a 1). La medición del potencial OFF se realizará durante el período de desconexión, pero no antes de 250 mseg después de interrumpir la corriente. Si el valor obtenido es de -850 mV o superior (en valor absoluto, es decir, más negativo) se considerará satisfecho el segundo criterio de validación.

En la práctica, suele utilizarse un sistema de registro continuo y graficación de los potenciales a lo largo de todo el período de ciclaje, lo cual posibilita analizar minuciosamente la respuesta de la estructura y determinar todos los parámetros de interés. Estos gráficos se obtendrán por medio de un conversor analógico – digital, el cual puede ser programado para realizar, por ejemplo, 1,000 tomas en cada ciclo de 10 segundos.

A través de estas curvas se pueden interpretar cabalmente las variaciones de potencial durante el ensayo, y observar el flanco descendente de la curva (instante de comienzo del OFF), evaluar los valores libres de caída óhmica I_xR , estudiar posibles interferencias originadas en sistemas electrificados ajenos a la red, etc.

La definición del sector de la red o el tramo de cañería en el cual se realizará la medición ON-OFF viene dada por la arquitectura del propio sistema y una serie de criterios que decidirá el operador.

En el caso de redes de distribución, la operación es significativamente más compleja, siendo necesario subdividir la zona a controlar en pequeñas áreas o *parcelas*. Un posible criterio a utilizar es que el número total de parcelas vendrá dado por la cantidad de unidades de corriente impresa existente, de tal forma que la cantidad de los interruptores sincronizados que instalemos abarcará no sólo la parcela en estudio, sino las que rodean a ésta.

De este modo, se minimizará la influencia de las fuentes conectadas en las parcelas adyacentes.

Evidentemente, deberá comprobarse la continuidad eléctrica de la cañería o sector de la red que desea evaluarse. Para ello, se cortocircuitarán todas las juntas de aislación intercaladas, a través de sus correspondientes cajas de continuidad.

No obstante, debe quedar claro que la única medición que puede considerarse correcta es la que se efectúa en el punto fijo pre-definido por la estación de medición de potenciales seleccionada en el centro de la parcela bajo estudio. Si no se dispone de una estación adecuada, podrá recurrirse a un tramo aéreo de cañería, siempre y cuando no exista una junta aislante entre el conducto que queremos evaluar y el punto accesible. Luego se debe eliminar la

pintura protectora de esta cañería para contar con una superficie limpia donde efectuar el contacto.

Según la Norma N.A.G. - 100 corresponde disponer de un punto fijo de medición cada 1,000 metros de longitud de los conductos de acero. Este requerimiento deberá complementarse en la práctica con las siguientes consideraciones:

- a) En líneas de transmisión que atraviesan terrenos altamente agresivos (valores de resistividad inferiores a 150 Ω-cm),

o bien,

cuando por las propias características de la instalación se midan potenciales en estaciones espaciadas cada 1,000 metros y no pueda asegurarse que ese valor se mantenga en los puntos intermedios

se ubicará un punto de medición cada 500 metros de cañería.

- b) En áreas urbanas o suburbanas en las que la cañería se vea afectada por diversas interferencias externas (contactos no deseados con estructuras ajenas, daños ocasionados por terceros, cercanía a sistemas electrificados, etc.) se dispondrá de un punto de medición cada 300 o 500 metros de cañería.

Cada caja o punto fijo dispondrá de una identificación o código, indicado en la base de datos de un sistema de información geográfica. El término “fijo” significa que será inamovible, a menos que se elimine ese punto o se modifique la traza de la cañería.

3.6.2 Método de medición de los potenciales naturales o estáticos

La determinación del potencial natural de una cañería enterrada será de utilidad si se aplica el tercer criterio de validación. La satisfacción de este criterio, tal como se dijo anteriormente, implica obtener una diferencia mínima de 100 mV entre el valor de potencial OFF y el aludido potencial natural o estático.

Primeramente, se definirá un sector eléctricamente continuo de la red o cañería en cuestión, dividiéndolo en parcelas en forma análoga a la ya explicada para la medición de potenciales ON-OFF, procediendo a ciclar todas las fuentes de corriente a fin de establecer el nivel de potencial OFF. A continuación, se desconectarán en forma gradual y consecutiva todas las fuentes de corriente que aporten en la zona en estudio, es decir:

- La parcela a analizar.
- Las parcelas circundantes.

- Otras posibles zonas en las que se advierta que las unidades de corriente impresa influencian los potenciales en la parcela bajo estudio.

El tiempo de desconexión dependerá de las características de la cañería o red estudiada, puesto que en principio deberá permitirse que la estructura se despolarice completamente antes de comenzar con las mediciones del potencial natural en cada estación de medición; en el caso de redes de distribución, no es inusual que este proceso de “descarga” insuma en el orden de 10 a 15 días; en todos los casos, el estado del revestimiento anticorrosivo, de la conductividad del terreno y de la superficie total del sistema.

Una alternativa válida cuando se busca exclusivamente validar el nivel de protección de acuerdo con el tercer criterio, consiste en monitorear continuamente la caída del potencial en cada punto de medición; si se grafican los valores obtenidos podrá observarse una curva continua que se aproximará asintóticamente al potencial natural o estático de la estructura; sin embargo, basta con que dicha curva corte la ordenada correspondiente al potencial OFF (previamente definido) más 100 mv para que sistema pueda considerarse validado.

Por ejemplo, si el potencial OFF arroja un valor de - 800 mv (por lo tanto, no verifica el segundo criterio) el proceso de descarga podrá interrumpirse y darse por validado el sistema de protección catódica cuando el potencial monitoreado alcance -700 mv; en realidad, si permitiéramos que la estructura continuase despolarizándose, los valores de potencial continuarían subiendo cada vez más lentamente hasta alcanzar el potencial natural, pero este proceso ya sería innecesario desde el punto de vista del tercer criterio.

3.6.3 Instrumentos utilizados para la medición del potencial

Las medición de potenciales se realiza por medio de multímetros electrónicos digitales y electrodos de referencia Cu-CuS0₄ dotados de talones porosos para reducir la resistencia de contacto a tierra; el terreno es previamente humedecido a fin de minimizar la impedancia en el punto de medición.

El multímetro debe operar como voltímetro - amplificador de elevada resistencia interna. Estos voltímetros tienen una impedancia de entrada del orden de 10 MΩ, lo cual es perfectamente suficiente para conseguir una medición precisa, aún cuando se utilicen electrodos de referencia provistos de una membrana de poco diámetro. En todos los casos, la resistencia interna del instrumento de medición debe ser al menos 100 veces superior a la resistencia total entre el electrodo y la cañería.

Cada medición se asocia a un punto fijo (estaciones de medición) representadas y geo-codificadas en los planos correspondientes, normalmente a través de un software de información geográfica para su mejor manejo a los efectos del relevamiento de potenciales ON-OFF y naturales.

Si durante el ciclaje o la desconexión permanente de las fuentes se detectan algunos puntos de monitoreo que están siendo influenciados por sistemas galvánicos o electrificados, se sustituirán por otros no afectados. En efecto, esos puntos pueden resultar de interés para analizar problemas de interferencia de la estructura, pero no serán de utilidad para la determinación de potenciales ON-OFF y naturales.

Por último, cabe destacar que actualmente es posible controlar y supervisar en forma remota y centralizada todas las operaciones de ciclaje, medición de potenciales y análisis de datos a través del SCADA del sistema; para ello, es necesario prever la instalación de las terminales remotas de control, adquisición y transmisión de datos en cada una de las unidades de protección catódica y en las estaciones de medición.

3.7 Tensiones eléctricas inducidas y corrientes de falla

Según se comentara en el Capítulo 1, la proximidad de estructuras electrificadas supone eventualmente problemas de operación tanto en el sistema de protección catódica como en otros sistemas auxiliares de los gasoductos e instalaciones asociadas.

Más aún, la ocurrencia de sobretensiones locales provocadas por descargas atmosféricas, o electromagnéticamente inducidas sobre las cañerías enterradas, y la circulación de corrientes eléctricas a lo largo de las mismas, supone un riesgo muy significativo para los operadores del sistema, cada vez que se encuentren trabajando en contacto con instalaciones conectadas directamente a las cañerías, por ejemplo válvulas de línea, estaciones de medición y regulación, estaciones de medición de potenciales, etc.

Las descargas y sobretensiones asociadas a corrientes de falla y descargas atmosféricas pueden destruir juntas de aislación, y perforar el revestimiento anticorrosivo de la cañería, creando focos de corrosión localizada intensa.

Por último, las corrientes continuas vagabundas provenientes de fugas o retorno desde sistemas electrificados (por ejemplo, líneas de transporte ferroviario, tranvías o subterráneos) pueden llegar a perforar la propia cañería por efecto de una corrosión electrolítica extremadamente intensa en el punto donde abandonan la superficie metálica para ingresar nuevamente al terreno.

3.7.1 Proximidad de las cañerías a líneas de alta y media tensión

El siguiente cuadro resume las distancias mínimas requeridas por la Norma N.A.G - 100 a tener en cuenta durante la fase de diseño de cañerías enterradas cuya traza discurre paralelamente a la de líneas electrificadas.

Separación Mínima entre Estructuras m				
Estructuras Próximas		Diámetro Nominal de la Cañería		
Desde:	Hasta:	D ≤ 152 mm (D ≤ 6")	203 mm ≤ D ≤ 305 mm (8" ≤ D ≤ 12")	D ≥ 355 mm (D ≥ 14")
Ramales. Líneas principales de una red de distribución. Gasoductos de transporte (en cualquier clase de trazado)	Líneas aéreas de alta tensión	5	10	10
	Líneas subterráneas de alta tensión (excluidos serviductos)	0,5	1	1
	Puestas a tierra de líneas de alta tensión	0,5 cada 10 kV (mín.10 m)	1m cada 10 kV (mín.10 m)	1 m cada 10 kV (mín.10 m)

Tabla 3.6: Distancias mínimas de separación entre cañerías enterradas y estructuras electrificadas, Según N.A.G – 100

Lo anterior se aplica a tramos de longitud apreciable en que ambos servicios tienen trazas paralelas (por ejemplo, cuando comparten una misma franja de servidumbre) y no debe entenderse como una limitación al cruce de las mismas; por el contrario, desde el punto de vista de la inducción electromagnética provocada por las líneas eléctricas sobre la cañería, debe observarse que las tensiones generadas son de signo contrario en sectores contiguos ubicados a un lado y otro del eje del sistema eléctrico, por lo cual la alternancia lateral de ambos servicios a lo largo de la franja compartida puede ayudar a prevenir la ocurrencia de sobretensiones de inducción elevadas.

Las medidas preventivas pueden complementarse interconectando la cañería afectada con las puestas a tierra de las torres o líneas de transmisión eléctrica, a través de *pantallas eléctricas*.

Las pantallas se diseñan para proteger la estructura de los efectos de las descargas de arco que pueden producirse a través del terreno entre los sistemas de energía de corriente alterna y las cañerías enterradas, reduciendo así la posibilidad de que la cobertura y/o la estructura se vea sometida a sobrecargas peligrosas.

Entre los factores que intervienen en el diseño de las pantallas eléctricas, se encuentran la medida en que la estructura es afectada y la magnitud del potencial eléctrico entre la estructura y tierra. Estos factores varían de una ubicación a la otra y deben ser calculados o determinados para cada ubicación específica.

Los puntos más vulnerables son aquellos donde la traza de la cañería atraviesa o se aproxima excesivamente al eje de una línea aérea o subterránea de transporte eléctrico; también son de especial interés los tramos cercanos a instalaciones de puesta a tierra, bases de torres de alta tensión, estaciones de transformación, zonas potencialmente afectadas por corrientes de falla o fugas, etc.

Las pantallas pueden consistir en uno o más electrodos instalados paralelamente y/o rodeando a la estructura que se pretende proteger en puntos específicos a lo largo de su longitud total.

Algunos tipos de pantallas, tales como las fabricadas con material anódico, deben conectarse eléctricamente y en forma directa a la estructura afectada por lo menos en cada extremo de las mismas.

Por el contrario, las pantallas construidas con materiales que son catódicos con respecto a la estructura protegida deberán ser conectados a través de un dispositivo desacoplador de corriente continua, a fin de evitar el drenaje de la corriente de protección catódica. Dichos dispositivos impiden el pasaje de corriente continua en potenciales reducidos, al tiempo que cierran el circuito y descargan a tierra a través de las pantallas cualquier sobrecarga originada por inducción electromagnética desde sistemas de corriente alterna cercanos a la cañería. Actualmente se dispone de distintos tipos de desacopladores, ya sean de naturaleza electro-química (como las celdas de cinc) o basados en dispositivos de estado sólido (Refs. [18] y [19])

La protección contra sobrecargas en estructuras enterradas o sobre superficie puede lograrse con otros tipos de pantallas eléctricas; por ejemplo, un conductor desnudo y enterrado paralelamente a la traza de la cañería, lo suficientemente largo, puede ser utilizado efectivamente como una pantalla eléctrica. También pueden emplearse mallas enterradas como forma de protección eficiente en instalaciones de superficie.

3.7.2 Descargas atmosféricas

Las puestas a tierra de las torres de alta tensión u otras estructuras provistas de pararrayos actúan, en caso de ser alcanzadas por una descarga atmosférica, como conductores de la descarga hacia la cañería. En efecto, una vez en el terreno, la descarga “buscará” el camino de menor resistencia eléctrica, para lo cual una cañería metálica enterrada en las proximidades ofrece una excelente opción.

La descarga podrá así ingresar a la cañería y “recorrerla” a lo largo de un tramo de longitud indefinida hasta eventualmente retornar al terreno en

algún punto más o menos alejado. Normalmente, el recubrimiento anticorrosivo será destruido en aquellos lugares donde la descarga ingresa o abandona la línea; además, es muy probable que el material dieléctrico de cualquier junta de aislación instalada en el tramo afectado resulte perforado, con la consiguiente pérdida de su función de separación y el posible origen de una fuga de gas.

Para prevenir estos incidentes, suelen utilizarse elementos de protección contra sobrecargas de origen atmosférico, comúnmente conocidos como *arrestadores de rayos*.

Los arrestadores de rayos pueden instalarse entre la estructura a proteger y las bases de las torres de transmisión eléctrica o sus sistemas de puesta a tierra; también se colocan en las juntas aislantes, vinculando ambas bridas a fin de proveer un by-pass y a la descarga circulante y/o su desviación a tierra.

Sin embargo, existe una restricción intrínseca al uso de arrestadores, que consiste en la diferencia de potencial transitoria que se desarrollará inmediatamente antes de su comutación. En ciertos tipos de arrestadores, este potencial puede ser lo suficientemente alto como para suponer un peligro real para las personas que tomen contacto con el arrestador en ese momento.

Cuando se utilicen arrestadores de rayos, los mismos deben conectarse a la estructura a través de cables generosamente dimensionados y provistos con una puesta a tierra confiable y de muy baja resistencia. Se ubicarán lo más próximo posible a la estructura a proteger y poseerán un conductor de tierra corto y directo.

Se instalarán conjuntamente con un circuito derivador adecuadamente dimensionado para permitir la aislación del dispositivo de tierra durante los ensayos o tareas de mantenimiento.

3.7.3 Proximidad a sistemas electrificados de corriente continua

Las corrientes vagabundas o parásitas que circulan por el terreno, generadas por problemas en los retornos de los sistemas de alimentación de corriente continua para la tracción de trenes ferroviarios u otras instalaciones de potencia, producen procesos corrosivos acelerados en las cañerías de acero que utilizan como ruta de retorno a la sub-usina.

Cuando estas corrientes ingresan a los conductos de acero en un determinado lugar, ésta zona asume una naturaleza catódica, elevándose su potencial negativo. Cuando la corriente abandona la cañería para retornar al terreno, el punto de salida se torna fuertemente anódico.

En estos puntos deben vincularse el retorno del sistema electrificado y la cañería afectada. Si empleamos un simple conductor eléctrico de sección adecuada y lo unimos al retorno y al caño de acero, no existirá la migración de la corriente a través del terreno, sino que esa circulación se canalizará por el cable que instalamos.

De esta forma eliminaremos el proceso corrosivo originado por las corrientes vagabundas, pero al cortocircuitar el sistema de retorno y la cañería disminuiremos el potencial catódico de protección de nuestro sistema, provocando otro tipo de problemas.

Una alternativa mucho más conveniente para erradicar o mitigar la problemática de las corrientes continuas vagabundas sin afectar el nivel de protección de nuestras cañerías consiste en utilizar el conductor de vinculación antes mencionado pero insertando un diodo semiconductor; de esta forma la corriente circulará en una sola dirección.

Este es el concepto del cual parte el diseño de una *unidad de drenaje*. Este elemento opera como un interruptor “inteligente” que da cuenta de la aleatoriedad típicamente asociada a la interferencia por corrientes vagabundas.

En efecto, la unidad de drenaje interrumpe el circuito de vinculación en cuanto el potencial en el punto de drenaje se incrementa a un valor prefijado y lo restablece cuando el potencial disminuye nuevamente.

Durante los períodos de drenaje, el potencial en el punto de conexión es variable, lo que da como resultado que la distancia en la cual se hace sentir la caída de potencial puede estar limitada localmente a un sector de la red o cañería.

Se puede entonces prever un *drenaje – transversión*: una unidad de corriente impresa refuerza constantemente el drenaje para que el criterio de protección sea alcanzado en todos los puntos de la red, o bien no se conecta más que cuando el drenaje está interrumpido.

Hay casos en que la protección por drenaje funciona unas veinte horas sobre veinticuatro. El interés de esta situación radica en que durante este tiempo la protección es completamente gratuita.

Tal como se mencionara, una unidad de drenaje de corriente parte del concepto de un conductor conectado en serie con un diodo semiconductor. Si tenemos en cuenta que las corrientes vagabundas pueden ser elevadas (del orden de varios cientos de ampères), resultará que el diodo aludido también deberá ser robusto para poder conducir estos valores.

En el caso de unidades destinadas a la protección contra retorno de sistemas de tracción eléctricos, suelen utilizarse diodos semiconductores de silicio, montados en un disipador de capacidad adecuada, que permiten la conducción de intensidades superiores a los 100 A y soportan una tensión en inversa de hasta 1,200 V, condición aceptable si se tiene en cuenta que la tensión de alimentación de los sistemas de tracción ferroviarios oscilan entre 800 y 1,000 VCC.

Sin embargo, las corrientes vagabundas superan en muchas ocasiones el valor indicado de 100 A. Por ello la unidad también incorpora resistencias lineales de tungsteno en atmósfera halógena, las cuales operan como

elementos limitadores de intensidad reduciendo la magnitud de la corriente ingresante hasta que la capacidad del diodo pueda asumirla.

Notas aclaratorias

- [1] Traducido y adaptado de A. W. Peabody – Ref. [1]
- [2] Traducido y adaptado parcialmente de A.W. Peabody – Ref. [1] y STECTA – Ref. [3]
- [3] El ión Fe^{++} generado en la reacción anódica se oxida posteriormente, luego de un tiempo, a Fe^{+++} , el cual se combina con el agua presente en el medio para formar óxido férrico hidratado; este último es lo que conocemos como “herrumbre”. La cantidad de agua contenida en este hidrato es variable, por lo cual su fórmula suele escribirse como $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{H}_2\text{O})_x$
- [4] El potencial de una celda electroquímica depende de las “medias celdas” catódica y anódica específicas que la integran. En principio, podrían tabularse los potenciales estándar de celda para todas las combinaciones posibles de cátodo y ánodo. En lugar de ello, resulta mucho más práctico asignar un potencial estándar a cada media celda y determinar luego el potencial estándar de celda (E°_{celda}) a partir de dichos valores.

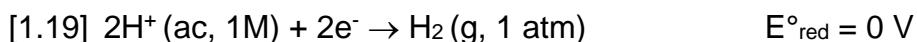
En efecto, el potencial de una celda electroquímica (o “voltaica”) viene dado por la diferencia entre dos potenciales de electrodo, uno asociado con el cátodo y el otro con el ánodo. Por convención, el potencial asociado con cada electrodo se elige de modo que sea el potencial de que ocurra una reducción en ese electrodo.

De este modo, los potenciales estándares de electrodo se tabulan para reacciones de reducción en condiciones estándar de temperatura (25 °C) y concentración en el electrolito de la respectiva sal normal en solución del metal considerado (1 M): se denominan “potenciales estándares de reducción” (E°_{red}). El potencial estándar de celda se calculará como:

$$[1.18] \quad E^\circ_{\text{celda}} = E^\circ_{\text{red}} (\text{cátodo}) - E^\circ_{\text{red}} (\text{ánodo})$$

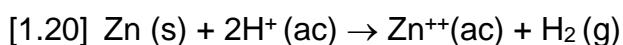
Puesto que en toda celda voltaica intervienen dos medias celdas, no es posible medir directamente el potencial estándar de reducción de una media reacción. Sin embargo, si se asigna un potencial estándar de reducción a una cierta media reacción de referencia (lo cual implica seleccionar una sustancia referencial y asignarle arbitrariamente, por ejemplo, $E^\circ_{\text{red}} = 0$), es posible determinar los potenciales estándar de reducción para cualquier otra media celda (es decir, para cualquier otra sustancia que pueda participar de una reacción de óxido-reducción).

La media reacción de referencia normalmente empleada es la reducción en condiciones estándar del catión H^+ en solución acuosa a hidrógeno gaseoso H_2 , a la cual se le asigna un potencial estándar de reducción igual a 0 V:



Al electrodo diseñado para producir esta media reacción se le llama “electrodo estándar de hidrógeno” (EEH). Un EEH se compone de un alambre de platino conectado a una hoja delgada del mismo material, cubierta de platino finamente dividido que sirve como superficie inerte sobre la que se desarrolla la reacción. El electrodo está encerrado en un tubo de vidrio, de modo que se pueda hacer burbujeante hidrógeno gaseoso sobre el platino, manteniéndose la solución acuosa de H^+ en condiciones estándar ($25^\circ C$, 1 M).

En la Figura 1.14 se muestra una celda volálica que emplea un EEH y un electrodo estándar de Zn^{++}/Zn . La reacción espontánea consiste en la oxidación del metal sólido puro Zn y la reducción del catión en solución acuosa H^+ :



En esta celda, el electrodo de Zn^{++}/Zn es el ánodo y el EEH es el cátodo; el voltaje de celda es +0.76 V (lectura directa del voltímetro conectado a los electrodos de la celda)

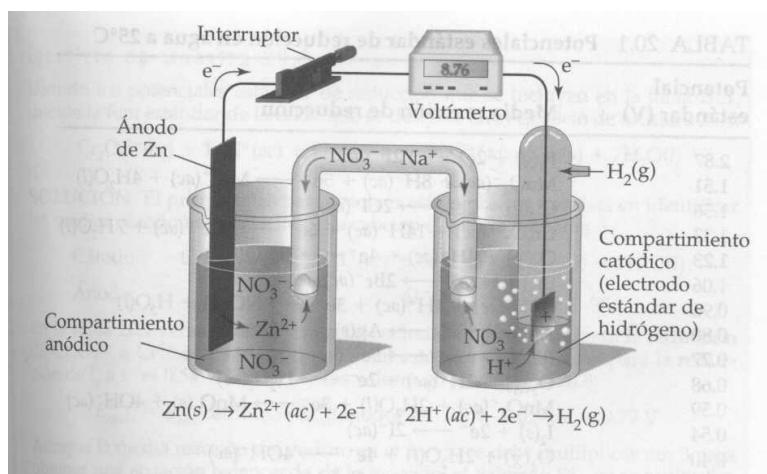


Figura 1.14: Determinación del potencial estandar de reducción del Zn con respecto al electrodo normal de referencia de hidrógeno

Utilizando que el potencial estandar de reducción definido para H^+ es cero y la Ecuación [1.18] se determina el potencial estandar de reducción de la media reacción Zn^{++}/Zn :

$$[1.21] \quad 0.77 \text{ V} = 0 \text{ V} - E^\circ_{\text{red}}(Zn^{++}/Zn) \Rightarrow E^\circ_{\text{red}}(Zn^{++}/Zn) = -0.77 \text{ V}$$

Obsérvese que la reacción anódica (Ecuación [1.20]) la escribimos como si se tratara de una reducción, aunque en realidad se desarrolla en sentido inverso, como una oxidación, en la celda de la Figura 1.8; siempre que asignamos un potencial a una media reacción, escribimos su ecuación como reducción, ya que de este modo fue definido el potencial estandar E°_{red} .

Repetiendo el procedimiento con otras sustancias es posible elaborar una Escala de Nernst como la incluida en la Tabla 1.1.

- [5] A pesar de la complejidad inherente al fenómeno de la corrosión, la teoría de Nernst da cuenta explícitamente de la dependencia funcional del mismo con respecto a alguna de las variables mencionadas.

En particular, la dependencia de la fem de la celda con respecto a la concentración de iones y a la temperatura del medio electrolito se puede obtener a partir de la fórmula para el cambio de energía libre de Gibbs (ΔG) respecto a la concentración de los reactivos y productos en las reacciones anódica y catódica; en efecto, la variación de energía libre se relaciona con la variación de energía libre estándar (ΔG_0) según:

$$[1.22] \Delta G = \Delta G_0 + RT \ln Q$$

Donde Q es el cociente de reacción, utilizando las concentraciones de los iones metálicos intervenientes en la reacción y que existen en el electrolito en un instante dado.

Por otra parte, la fem de una celda electroquímica (E) es función directa de la variación de energía libre, a través de la expresión:

$$[1.23] \Delta G = -nFE$$

Donde n representa en número de moles de electrones que se transfieren en la reacción y F es la *Constante de Faraday*, igual a la carga eléctrica total de 1 mol de electrones. Dicha cantidad de carga se define como un faradio, estableciéndose las siguientes equivalencias:

$$[1.24] 1 F = 96,500 \text{ Coulombs / mol e}^- = 96,500 \text{ J / V.mol e}^-$$

Si se sustituye [1.23] en [1.24] y se resuelve la expresión resultante para E , se obtiene la *Ecuación de Nernst*:

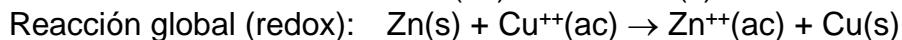
$$[1.25] E = E_0 - RT/nF \ln Q$$

En general, se utilizan la Ecuación de Nernst se expresa utilizando logaritmos decimales y suponiendo $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$ ($\approx 15 \text{ }^\circ\text{C}$), con lo cual resulta $RT/F = 0.0257 \text{ V.mol}$. Obtenemos así la siguiente simplificación de la expresión [1.25]:

$$[1.26] E = E_0 - 0.0592/n \log Q$$

Esta ecuación permite calcular la fem total de una celda electroquímica (para una temperatura $T = 298 \text{ }^\circ\text{K}$) a partir de las concentraciones de reactivos y productos.

A modo de ejemplo, consideremos una celda formada por dos electrodos de Zn y Cu respectivamente, inmersos en un medio (electrolito) que contiene sales de estos metales en solución acuosa (CuSO_4 y ZnSO_4 cuya disociación origina iones Cu^{++} y Zn^{++} que intervienen en la reacción) De acuerdo con la Tabla 1.1, el cobre actuará como cátodo de la celda, en detrimento del Zn que será consumido en el ánodo:



En este caso, $n = 2$ (se transfieren dos electrones del Zn al Cu^{++}) y la fem estándar es (según la Tabla 1.1) $E_0 = 0.33 - (-0.77) = 1.10 \text{ V}$.

El cociente de la reacción es $Q = [\text{Zn}^{++}] / [\text{Cu}^{++}]$, puesto que los sólidos puros no se consideran en la expresión de Q. Por lo tanto, la Ecuación de Nernst para esta celda electroquímica (a una temperatura de 298 °K) resulta:

$$[1.27] \quad E = 1.10 \text{ V} - 0.0296 \text{ V} \times \log [\text{Zn}^{++}]/[\text{Cu}^{++}]$$

De esta expresión se evidencia que la fem de la celda aumenta con la concentración de Cu^{++} y conforme disminuye la de Zn^{++} . Por lo tanto, si la concentración de los reactivos aumenta en relación con la de los productos, la reacción de la celda se torna más espontánea, incrementándose su fem. Por el contrario, si la concentración de los productos aumenta con respecto a la de los reactivos (por ejemplo, a medida que se consume el ánodo y disminuye la superficie en contacto con el electrolito) la fem disminuye.

- [6] En realidad, ambas magnitudes (ΔV_H y ΔV_{Cs}) son físicamente indisociables, puesto que integran la fem total de una celda electroquímica única cuyos polos son, respectivamente, la superficie metálica evaluada y el electrodo de referencia o “hemipila”.
- [7] La hipótesis de que no existe circulación de corriente a través del terreno o medio acuoso en que se encuentra instalada la estructura metálica es esencial para asumir que no se produce una caída de potencial adicional entre la superficie de dicha estructura y el electrodo de referencia (caída de potencial (óhmico). Esta condición ideal se aproxima en la práctica desconectando simultáneamente todas las posibles fuentes de energía vinculadas a la cañería al momento de realizar la medida de potencial; los valores así determinados se conocen como potenciales “OFF” de la estructura. Alternativamente, es posible evaluar el proceso de corrosión a partir de los valores de potencial medidos con las referidas fuentes activas en contacto con la estructura, sin embargo en este caso será necesario evaluar de algún modo las caídas óhmicas de potencial para descontarlas de la lectura obtenida. Estos valores se conocen como potenciales “ON”.

Ambas opciones originan métodos de medición que son aplicables y están incorporados en las normas técnicas y reglamentaciones específicas, puesto que tanto una como la otra ofrecen ventajas y desventajas relativas, brindando información complementaria en la mayoría de los casos. Más adelante se analizarán con mayor grado de detalle ambas alternativas y sus respectivas técnicas de aplicación.

- [8] La influencia del índice de acidez (pH) del medio electrolito en la corrosión de la estructura metálica en contacto con la misma se indica claramente en los *Diagramas de Pourbaix*. Estos diagramas describen las posibles reacciones entre un metal y sus iones en solución acuosa, como función del pH del medio y el potencial de la estructura medido con respecto a un electrodo de referencia estándar.

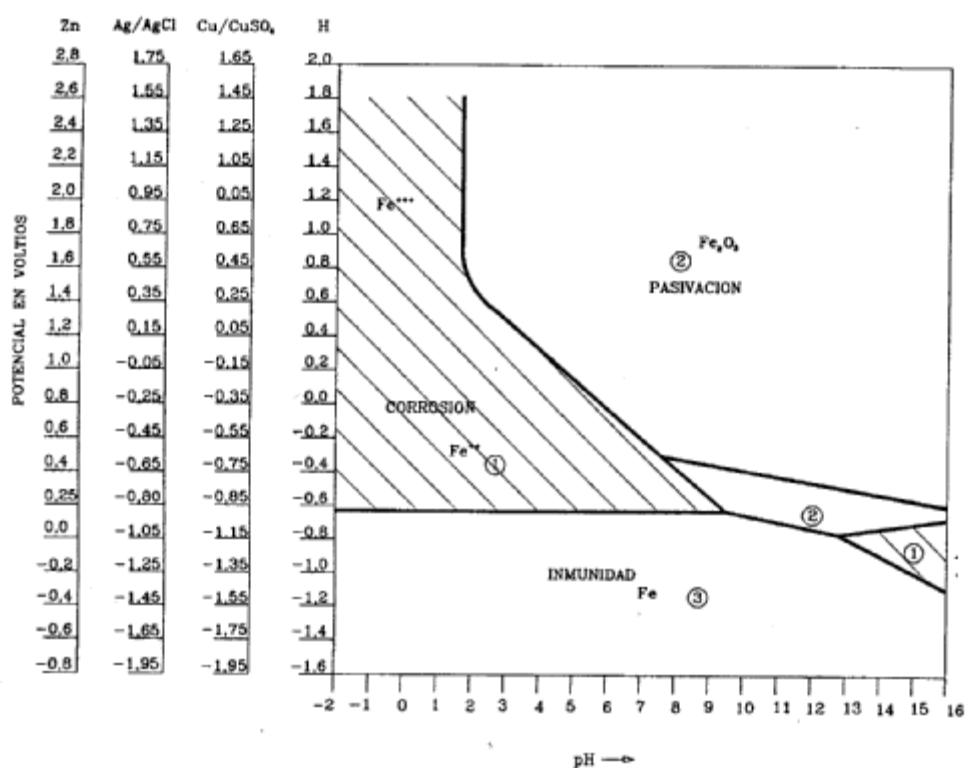


Figura 1.15: Diagrama de Pourbaix para hierro en agua a 25°C

La Figura 1.15 representa el diagrama correspondiente a la corrosión de hierro en agua, a una temperatura de 25°C; pueden distinguirse tres zonas bien diferenciadas:

- I: Zona de Corrosión: En esta región, el hierro se corroe, degradándose para formar sales e hidróxidos solubles. Es la zona de mayor peligro desde el punto de vista de la corrosión.
- II: Zona de Pasivación: La superficie metálica se encuentra moderadamente protegido o “pasivado” por una película de óxido protector que lo aísla del medio circundante. Se trata, sin embargo, de una región inestable.

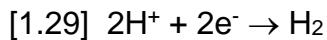
- *III: Zona de Inmunidad:* El hierro permanece en estado metálico y protegido de la corrosión.

Debe observarse que, si bien el diagrama de la Figura 1.15 es estrictamente válido sólo para hierro en contacto con agua a 25°C; sin embargo, en términos generales ilustra el comportamiento típico de los aceros en medios acuosos a temperatura ambiente.

- [9] Ello se verificará en ausencia de un sistema activo de protección anticorrosiva conectado a la estructura bajo estudio. En efecto, tal como se analizará en el Capítulo 3, la inversión de la polaridad natural que asumiría la estructura metálica a proteger con respecto a su entorno (constituida así en cátodo de la celda de corrosión) es el fundamento de los sistemas llamados, precisamente, “de protección catódica”; en tales condiciones (es decir, con la estructura adecuadamente protegida por dicho sistema) la lectura que obtendríamos con el esquema de la Figura 1.3 tendría signo positivo, indicando que existe una corriente eléctrica positiva neta ingresando desde el medio electrolito a la superficie metálica. Según lo observado en la Sección 1.2, ello asegura, en principio, que la estructura analizada no se encuentra sometida a corrosión.

El hecho de que la estructura asuma un potencial negativo (catódico) con relación a su entorno se denomina *polarización*, distinguiéndose dos fenómenos complementarios y que en la práctica se presentan simultáneamente:

- a) *Polarización catódica:* Es la consecuencia directa de la aplicación de un sistema de protección catódica sobre una estructura metálica y consiste en la inversión de su potencial natural. Implica una acumulación de cargas negativas en la superficie de la estructura y de cargas positivas en el medio circundante (generalmente cationes en solución acuosa contenidos en el electrolito) originando así un capacitor en la interfase de contacto entre la estructura y el medio electrolito, cuyo proceso de carga y descarga se manifiesta claramente durante la conexión y desconexión del sistema de protección catódica (ciclaje sincronizado ON-OFF de las fuentes activas en contacto con la estructura) y resulta de gran utilidad para su monitoreo y control.
- b) *Polarización ambiental:* La circulación de una corriente eléctrica positiva neta desde el medio electrolito hacia la superficie metálica, que impone el sistema de protección catódica, produce una serie de transformaciones de naturaleza físico-química en el medio circundante que son altamente beneficiosas desde el punto de vista de la mitigación de la corrosión y complementan la acción de la polarización catódica. Este conjunto de transformaciones se denomina “polarización del medio” o “polarización ambiental” y se fundamenta en la ocurrencia de una serie de reacciones químicas que tienen lugar en la interfase entre la superficie de la estructura y el medio electrolito:



Según expresan las Ecuaciones [1.28] a [1.30] las reacciones de reducción (catódicas) que se dan en la superficie protegida (como consecuencia de la aplicación del sistema de protección catódica) generan aniones OH⁻ y consumen cationes H⁺, promoviendo un incremento del pH o alcalinización del medio, lo cual es beneficioso por cuanto la tasa o velocidad de corrosión de los aceros en medios acuosos disminuye a medida que aumenta el pH, aún en condiciones naturales (es decir, sin aplicación de un sistema de protección anticorrosiva: ver el Diagrama de Pourbaix en la Figura 1.15) Este fenómeno, conocido como “pasivación” del metal es consecuencia directa de la formación de una película de óxido protector en la región (2) del referido diagrama.

Por otra parte, la formación de hidrógeno (Ecuaciones [1.29] y [1.30]) también es deseable, siempre y cuando no sea excesiva (es decir, si no provoca el desarrollo de burbujas de H₂ bajo el revestimiento anticorrosivo, provocando así su degradación; este fenómeno es conocido como “despegue catódico” y resulta de la aplicación de potenciales de protección catódica excesivamente elevados: sobreprotección de la estructura) En efecto, el hidrógeno forma una película aislante sobre la superficie metálica, que se constituye en un revestimiento anticorrosivo adicional suplementario del material aislante con que cuenta la estructura, de gran importancia sobre todo en aquellos puntos donde ésta última sufre imperfecciones, perforaciones o degradación. Precisamente, es esta película molecular de H₂ la que es degradada por la acción de bacterias sulfato-reductoras responsables de la corrosión microbiológica, que promueven de este modo la “despolarización” de la superficie metálica y activan la agresividad natural del entorno.

Finalmente, el flujo de corriente asociado a la protección catódica provoca la migración desde la superficie metálica de radicales aniónicos perjudiciales, tales como cloruros, mitigando así su acción corrosiva.

Cabe destacar que, al igual que para la polarización catódica, la polarización ambiental puede ser analizada y medida durante el proceso de despolarización o “descarga” de la estructura que sigue inmediatamente a la desconexión sincronizada de todas las fuentes activas del sistema de protección catódica. Para ello, es necesario registrar y graficar los valores de potencial estructura – suelo durante un período de tiempo que tiene una duración del orden de décimas de segundo en el caso de la despolarización catódica, y de horas o días para la despolarización ambiental. Según se explica en el Capítulo 3, los fenómenos de polarización catódica y ambiental constituyen

respectivamente el fundamento de sendos criterios de validación del sistema de protección catódica (a saber, el *Criterio del Mínimo Potencial OFF* y el *Criterio de Mínima Variación con Respecto al Potencial Natural*)

- [10] Desde un punto de vista microscópico, la velocidad de crecimiento de la película de óxido viene dada por los coeficientes de difusión a través de la misma para las distintas especies químicas que intervienen en el proceso. Ello se relaciona directamente con la porosidad de la película de óxido (y por lo tanto con el coeficiente R_{BP}) pero también con su conductividad eléctrica, dado que bajo ciertas circunstancias los electrones deben migrar desde la superficie del metal de origen hacia la interfase gas-óxido para alimentar las reacciones de reducción.

Este fenómeno se manifiesta particularmente en el caso de la corrosión de metales homogéneos aislados de otras estructuras metálicas e inmersos en un medio agresivo; por ejemplo la corrosión superficial atmosférica o marina en aceros desprovistos de un adecuado recubrimiento anticorrosivo. Por el contrario, cuando la corrosión está asociada a la formación de una celda de corrosión, la circulación de los electrones se produce a través del medio conductor que vincula las regiones anódica y catódica (a menudo, la propia estructura metálica que se corroe) en lugar de atravesar la película de óxido.

En la Figura 1.16 se representan los cuatro casos fundamentales que pueden producirse en el desarrollo de la corrosión atmosférica.

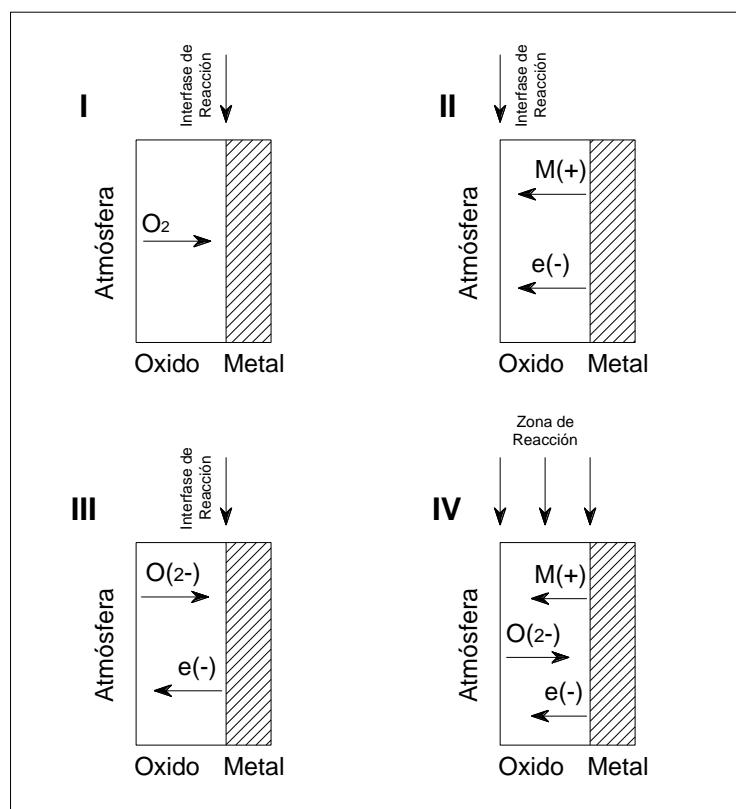


Figura 1.16: Mecanismos de corrosión atmosférica.

Caso I: Si la película de óxido producida al principio es porosa ($R_{BP} < 1$), el oxígeno molecular puede pasar por sus poros y reaccionar con el metal de origen en la interfase óxido-metal.

Caso II: Si la película no es porosa ($R_{BP} \geq 1$) la reacción tiene lugar en la interfase óxido-aire. En este caso, los iones metálicos difunden desde la superficie óxido-metal hacia fuera, hasta alcanzar la interfase aire-óxido. Los electrones también migran en la misma dirección para completar la reacción de reducción.

Caso III: La reacción también puede tener lugar en la interfase metal-óxido cuando el film no es poroso ($R_{BP} \geq 1$). En este caso, los iones de oxígeno difunden dentro de la película para reaccionar en la interfase metal-óxido y los electrones, al igual que en el caso anterior, deben ser libres para moverse hacia la interfase aire-óxido.

Caso IV: El último mecanismo posible es una combinación de los casos II y III, en el cual los iones oxígeno difunden en la película de óxido al tiempo que tanto los iones metálicos como los electrones se mueven en dirección contraria, desde la interfase óxido-metal hacia fuera. En este caso, la reacción de reducción tiene lugar en cualquier parte de la capa de óxido.

Los casos II, III y IV exigen que la difusividad iónica y la conductividad eléctrica en el sólido sean elevadas. Si la conductividad eléctrica es baja, la velocidad de crecimiento de la película de óxido estará limitada por el reducido número de electrones que se mueven desde el metal hacia la interfase aire-óxido, por lo cual la protección por pasivación será más efectiva, disminuyendo drásticamente la velocidad de corrosión (Ecuación [1.17 c])

- [11] En los gasoductos y cañerías de alta presión, el daño por HSC suele manifestarse en forma de fisuras longitudinales superficiales o sub-superficiales, extremadamente delgadas y de difícil detección. Uno de los avances más recientes en este sentido ha sido el desarrollo de vehículos de inspección interna capaces de localizar estas anomalías por medio de una sofisticada técnica ultrasónica (conocida como *Elastic Wave Crack Detection*) basada en la emisión de pulsos y recepción, análisis e interpretación de las reflexiones ("ecos") originados por defectos orientados axialmente en el metal de la cañería.
- [12] Adaptado parcialmente de L.S. Hernández – Ref. [29]
- [14] Adaptado parcialmente de ENARGAS – Ref. [11]
- [15] La técnica de inspección *holiday* se basa en la aplicación de una diferencia de potencial entre la cañería y un elemento metálico (rodillo, cepillo, anillo toroidal, etc.) que se desliza sobre la superficie externa revestida, de modo que, en aquel punto donde exista una discontinuidad (*holiday*) o adelgazamiento excesivo del revestimiento, se producirá una

descarga de arco entre la cañería y el elemento de detección. El instrumento evidencia dicha descarga a través de una señal audible y, a veces luminosa, que advierte al operario de su existencia. El potencial aplicado, del orden de 10 a 30 KV en revestimientos de poliolefinas extruídas, depende del espesor de éste último y viene especificado en los estándares de aplicación (Refs. [12] y [13])

- [16] El método de Pearson provee una técnica para evaluar desde la superficie el estado del revestimiento de una cañería enterrada. Se fundamenta en la introducción de una señal electromagnética de frecuencia conocida en la cañería, para luego detectar los puntos en los cuales fuga a tierra a lo largo de la traza.
- [17] Esta suposición será estrictamente válida cuando los distintos tramos protegidos se encuentren separados entre sí por medio de juntas de aislación.

También podría argumentarse que, aún en ausencia de elementos de separación la corriente que circula a través de la sección transversal de la cañería disminuye en valor absoluto como consecuencia de la atenuación de la protección catódica, a medida que nos alejamos del punto de drenaje, hasta virtualmente anularse e invertir su sentido de circulación al alcanzar la zona de la cañería protegida por otra fuente de corriente impresa.

Conviene observar que, aún introduciendo hipótesis notablemente simplificadoras (uniformidad de las propiedades eléctricas de la cañería, su revestimiento y el terreno adyacente, constancia de los factores R_T y R_L a lo largo de la traza, separación eléctrica de tramos contiguos de cañería protegidos por sistemas diferentes, ausencia de contactos con estructuras ajena, etc.) el análisis que hemos presentado se refiere a una configuración extremadamente sencilla, esto es, un tramo de cañería de dimensiones constantes sin derivaciones ni instalaciones auxiliares conectadas.

En la práctica, los cálculos analíticos sólo se consideran como una primera estimación durante la fase de diseño, debiendo complementarse necesariamente y en forma empírica con la experiencia del proyectista y la información de campo obtenida de la propia operación del sistema de protección catódica. Ello es particularmente cierto en el caso de redes de distribución y sistemas de gasoductos interconectados, donde la complejidad de la arquitectura y las numerosas interferencias con otras instalaciones puede tornar virtualmente imposible desarrollar un modelo cuantitativamente válido que dé cuenta del comportamiento eléctrico de la estructura.

[18] N.A.G 100 - APENDICE D

CRITERIOS PARA PROTECCION CATODICA Y SU MEDICION

1. CRITERIOS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Los criterios y metodología a emplear, para las estructuras de acero y fundición, son los que a continuación se enumeran, debiendo su aplicación ajustarse a lo indicado en cada caso.

- 1.1 *Un potencial negativo (catódico) de por lo menos 850 mV, con la protección catódica aplicada. Este potencial está referido a un electrodo de Cu/SO₄Cu saturado. Las caídas de tensión distintas de las producidas en la interfase estructura-electrolito, deben ser determinadas para la interpretación válida de este criterio.*

Nota: Dichas caídas serán determinadas por alguno de los siguientes métodos:

- 3.7.1 *por medición o cálculo.*
 - 1.1.2 *por revisión del comportamiento histórico del sistema de protección catódica.*
 - 1.1.3 *por evaluación de las características físicas y eléctricas de la cañería y su entorno.*
 - 1.1.4 *por determinación de evidencias físicas de corrosión.*
- 1.2 *Un potencial negativo de polarización de por lo menos 850 mV con respecto a un electrodo de referencia de Cu/SO₄Cu saturado.*

La medición de este potencial se hará sin la aplicación de la corriente de protección (para el caso de existir el aporte de más de una fuente, se deberán interrumpir las mismas simultáneamente y en forma periódica)

- 1.3 *Un mínimo de 100 mV de polarización catódica entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito. La formación o decaimiento de la polarización puede ser medido para satisfacer este criterio.*

2. CONDICIONES ESPECIALES

En algunas situaciones, tales como presencia de sulfídricos, bacterias, elevadas temperaturas, medios ácidos y materiales disímiles, los criterios indicados pueden no ser suficientes, por lo tanto para:

- *en caso de operarse con altas temperaturas, los valores fijados deberán incrementarse en 3 mV/C° a partir de 25° C (temperatura de la estructura)*
- *en caso de presencia bacteriana, los valores indicados se incrementarán en 100 mV.*

3. MONITOREO CONTINUO DE POTENCIALES Y DEL ESTADO DEL REVESTIMIENTO

Deberán realizarse relevamientos continuos de potenciales paso a paso de estructuras-suelo, métodos “OFF” (sin corriente aplicada) y “ON” (con corriente aplicada), en los siguientes casos:

- 3.1 *Cuando no se pueda garantizar los potenciales entre los puntos kilométricos de monitoreo.*
- 3.2 *En zonas protegidas galvánicamente.*
- 3.3 *En aquellas zonas donde se registren fallas por corrosión no concordantes con los datos históricos de los niveles de protección catódica en ellas.*
- 3.4 *En todos aquellos casos en que se detecten problemas de interferencia de cualquier tipo.*

La frecuencia entre relevamiento será responsabilidad del operador y deberá garantizar el control anticorrosivo. En ningún caso el lapso entre monitoreos será mayor de cinco años, informándose acerca de las decisiones adoptadas.

4. RELEVAMIENTO DE POTENCIALES DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS

- 4.1 *Se deberán relevar teniendo en cuenta los criterios indicados en la Sección I.*
- 4.2 *El método empleado deberá garantizar una distancia electrodo – tubería menor de 2m.*
- 4.3 *Los registros de valores serán continuos.*

5. INTERFERENCIA

ESTRUCTURAS EXISTENTES

Toda estructura ajena (no interconectada) deberá preservarse de las interferencias generadas a partir del sistema de protección catódica instalado. Se considerará que una estructura es influenciada cuando se produzca una variación > de 50 mV (de cualquier signo) en su potencial.

PROYECTOS

A fin de determinar la ubicación correcta de los dispersores de corriente en referencia a estructuras extrañas, se considerarán no interferidas cuando el gradiente de potencial eléctrico en el terreno y referido a tierra remota, no supere los 500 mV. A tal efecto se deberá indicar en todo proyecto la distancia mínima a mantener.

En el caso de detectarse problemas de interferencia, el operador de la línea interferente deberá tomar las medidas adecuadas para eliminarla.

6. COBERTURAS

6.1 INSPECCION

Se efectuarán ensayos del revestimiento para determinar y/o detectar discontinuidades eléctricas en el mismo. Esta inspección se efectuará:

- finalizada su aplicación.
- en el momento de bajada a zanja.

6.2 TIPO DE ENSAYO

BAJA TENSIÓN (<90 volt)

Se podrán utilizar detectores de baja tensión para espesores no mayores a 0,35mm.

ALTA TENSIÓN

El electrodo será tal que la distancia entre los puntos donde hace contacto con el revestimiento no sea más de 0,25 mm por cada 1.000 volt de tensión de prueba.

La velocidad de pasaje será de aproximadamente 0,3 m/s (paso normal)

No se deberá llevar a cabo inspecciones sobre superficies húmedas.

De no contarse con un medidor de tensión adecuado, la regulación podrá determinarse (provisoriamente) fabricando una falla en el revestimiento a inspeccionar, ajustándose el instrumento para detectarla a la velocidad normal de pasaje.

Los valores de tensión a aplicar en cada caso serán los indicados en la norma correspondiente.

Los detectores se calibrarán con el dispositivo adecuado a su principio de funcionamiento (según recomendación del fabricante)

MATERIAL DE GUIA

NORMA GE-N1-108

RP 0169-92 N.A.C.E. (National Association of Corrosion Engineers)

*HANDBUCH DES KATHODICHEN KORROSION SCHUTZES W.V.
BAECKMANN UND W.SCHWENK*

Referencias y bibliografía de consulta

- 0 *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States.* Estudio llevado a cabo entre los años 1999 y 2001 por CC Technologies Laboratories, Inc. Con patrocinio de The U.S. Federal Highway Administration (FHWA) y NACE.
- 1 *Control of Pipeline Corrosion.* A. W. Peabody. Second Edition. NACE Press, 2001. ISBN 1-57590-092-0
- 2 *NACE Corrosion Engineer's Reference Book.* Third Edition by Robert Baboian. NACE Press, 2002. ISBN: 1-57590-127-7
- 3 *La Protección Catódica de las Canalizaciones Subterráneas de Acero.* Sociedad Técnica y Comercial de Canalizaciones Subterráneas en Tubos de Acero (STECTA) – Francia.
- 4 *A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion. Volume 2.* Edited by John G. Stoecker II. NACE Press, 2001. ISBN: 1-57590-113-7
- 5 *Instalaciones de Gas (Capítulo VII: Protección de Cañerías)* Néstor Pedro Quadri. Tercera Edición, 1998. Editorial Alsina, Argentina. ISBN: 950-553-056-0
- 6 *Instalaciones de Combustibles Gaseosos (Apéndice A.2.: Corrosión)* J. A. de Andrés; S. A. Lastra; M. G. Gándara. Primera Edición, 1997. Editorial A. Madrid Vicente, España. ISBN: 84-87440-89-4
- 7 *Química: La Ciencia Central (Capítulo 20: Electroquímica)* T. L. Brown, H.E. LeMay, B. E. Bursten. Séptima Edición, 1998. Prentice Hall, México. ISBN 970-17-0169-0
- 8 *Normas Argentinas Mínimas de Seguridad Para el Transporte y Distribución de Gas Natural y Otros Gases por Cañerías N.A.G. – 100 (Parte I: Requisitos Para el Control de la Corrosión. Apéndice D: Criterios Para Protección Catódica y su Medición)* Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) República Argentina
- 9 *RP0169-96: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System. Standard Recommended Practice.* NACE International – 1996. ISBN: 1-57590-035-1
- 10 *BS 7361: Cathodic Protection. Part 1: Code of practice for land and marine applications.* The British Standards Institution (BSI) – 1996
- 11 *Norma GE-N1-108: Revestimientos Anticorrosivos de Tuberías y Accesorios.* Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) República Argentina

- 12 CAN/CSA-Z245.20.- M92: *External Fusion Bond Coating for Steel Pipe.* National Standards of Canada. Prepared by the Canadian Standards Association (CSA)
- 13 CAN/CSA-Z245.21.- M92: *External Polyethylene Coating for Pipe.* National Standards of Canada. Prepared by the Canadian Standards Association (CSA)
- 14 RP0177-2000: *Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems. Standard Recommended Practice.* NACE International – 2000. ISBN: 1-57590-116-1
- 15 AC Corrosion. MP Forum. *Materials Performance*, September 2001. Pgs. 28...31
- 16 *The Impact of Lightning on Rectifier Remote Monitoring Systems.* Gerald Lemire, Karl Nicholas. *Materials Performance*, June 2001. Pgs. 22...26
- 17 *Determining the Effects of Pipelines Built in Electric Transmission ROW.* Robert F. Allen. *Pipeline & Gas Journal*, February 2001. Pgs. 38...41
- 18 *Induced AC Creates Problems for Pipe Lines in Utility Corridors.* John S. Smart III, Dirk L. van Oostendorp, William A. "Bud" Wood. *Pipe Line & Gas Industry*, June 1999. Pgs. 25...32
- 19 *Testing and Monitoring of AC Mitigation and Cathodic Protection on Pipelines in Joint-Facility Corridors.* Robert F. Allen. *Materials Performance*, April 2002. Pgs. 20...23
- 20 Stress Corrosion Cracking of Pipelines. Pipeline CICS. Compilations of papers and articles from NACE topical symposia and conferences, *Materials Performance* magazine, *Corrosion* magazine, book proceedings, and technical committee reports. NACE International –2001
- 21 TM0284-96: *Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking. Standard Test Method.* NACE International – 1996. ISBN: 1-57590-020-3
- 22 *An Overview of Advanced Methods for the Assessment of Corrosion in Linepipe.* B. Fu, A. D. Batte. *Offshore Technology Report – OTO 1999 051.* Health & Safety Executive (HSE), August 1999
- 23 RP0185-96: *Extruded Polyolefin Resin Coating Systems with Soft Adhesives for Underground or Submerged Pipe. Standard Recommended Practice.* NACE International – 1996. ISBN: 1-57590-017-3
- 24 RP0394-94: *Application, Performance, and Quality Control of Plant-Applied, Fusion Bonded Epoxy External Pipe Coating. Standard Recommended Practice.* NACE International – 1994.

- 25 *The 100-mV Depolarization Criterion for Zinc Ribbon Anodes on Externally Coated Tank Bottoms.* Maller A. Al-Arfaj. *Materials Performance*, January 2002. Pgs. 22...26
 - 26 *RP0572-2001: Design, Installation, Operation, and Maintenance of Impressed Current Deep Groundbeds. Standard Recommended Practice.* NACE International – 2001. ISBN: 1-57590-117-X
 - 27 *RP0286-97: Electrical Isolation of Cathodically Protected Pipelines. Standard Recommended Practice.* NACE International – 1997. ISBN: 1-57590-041-6
 - 28 *A Review of Soil Resistivity Measurements for Grounding, Corrosion Assessment, and Cathodic Protection.* Richard C. Benson. *Materials Performance*, January 2002. Pgs. 28...34
- Technical Report on the Application and Interpretation of Data from External Coupons Used in the Evaluation of Cathodically Protected Metallic Structures.* NACE International – February 2001. International Publication N° 35201