

TABLA DE CONTENIDO

5.	AREA ELECTROMECAÁNICA. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN LAS TUBERÍAS MATRICES DEL ACUEDUCTO.	5-1
5.1.	INFORMACIÓN GENERAL	5-1
5.1.1	<i>DEFINICIÓN DE CORROSIÓN.</i>	5-1
5.1.2	<i>CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN.</i>	5-1
5.1.2.1	Según medio agresivo.	5-2
5.1.2.2	Según la forma.....	5-2
5.1.3	<i>CAUSAS DE LA CORROSIÓN.</i>	5-3
5.2.	CORROSION EN TUBERÍAS PARA AGUA POTABLE	5-3
5.2.1	<i>SUELOS CORROSIVOS.</i>	5-4
5.2.1.1	Agresividad de los suelos	5-5
5.2.2	<i>TIPO DE MATERIALES Y TUBERÍAS PARA ACUEDUCTO.</i>	5-6
5.2.2.1	TUBERIAS INSTALADAS EN LA RED DE BOGOTA.....	5-7
5.2.3	<i>TIPOS DE JUNTA O UNIONES.</i>	5-7
5.2.4	<i>ACCESORIOS</i>	5-8
5.2.5	<i>REVESTIMIENTOS.</i>	5-9
5.2.6	<i>CONTROL DE LA CORROSIÓN.</i>	5-9
5.2.6.1	Protección contra corrosión en la red matriz.	5-11
5.2.7	<i>CAUSAS DE LA CORROSIÓN.</i>	5-12
5.2.7.1	Tuberías de fundición gris o de hierro dúctil.....	5-12
5.2.7.2	Tuberías de acero, CCP y PCCP.	5-13
5.3.	EQUIPOS, PRUEBAS Y ENSAYOS PARA DETERMINAR LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS	5-13
5.3.1	<i>CORROSIÓN INTERIOR.</i>	5-14
5.3.2	<i>CORROSIÓN EXTERIOR.</i>	5-16
5.3.2.1	LÍNEAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA.	5-16
5.3.2.2	LÍNEAS SIN PROTECCIÓN CATÓDICA.	5-17
5.3.3	<i>MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CORROSIÓN.</i>	5-18
5.3.4	<i>PROGRAMA DE TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYOS DE LABORATORIO A EJECUTAR EN EL ESTUDIO.</i>	5-20
5.3.4.1	Parámetros a analizar.....	5-20
5.3.4.1.1	<i>Contenido de cloruros.</i>	5-21

5.3.4.1.2	Contenido de sulfatos	5-22
5.3.4.1.3	Ión hidrógeno o pH	5-22
5.3.4.1.4	Resistividad eléctrica	5-22
5.3.4.1.5	Humedad.....	5-23
5.3.4.2	Criterio de análisis	5-23
5.3.4.3	Toma de muestras	5-24
5.3.5	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	5-24
5.3.6	LOCALIZACIÓN DE LOS MUESTREOS	5-25

INDICE DE TABLAS

Tabla No. 5.3.1.	Criterios para la evaluación de los parámetros seleccionados	5-21
Tabla No. 5.3.2.	Rango de valoración de los parámetros empleados en el Método de los 10 puntos.....	5-23
Tabla No. 5.3.3.	Ensayos de laboratorio para determinar agresividad en suelos	5-25
Tabla No. 5.3.4.	Líneas y sitios seleccionados para la toma de muestras	5-25

5. AREA ELECTROMECAÁNICA. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN LAS TUBERÍAS MATRICES DEL ACUEDUCTO.

5.1. INFORMACIÓN GENERAL

5.1.1 DEFINICIÓN DE CORROSIÓN.

El fenómeno de la corrosión se define como la destrucción o deterioro químico o electrolítico de un material, preferiblemente metálico, por la reacción con el medio ambiente que lo rodea. El ataque del material se inicia en la superficie y los productos de esta reacción pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos. El metal que se corroe tiende a formar una combinación química.

La corrosión no es siempre fácil de detectar y menos en estructuras enterradas como es el caso de las tuberías de la red matriz, pues no se presenta bajo una única forma, como óxido o herrumbre, sino bajo millares de formas distintas.

La corrosión es un proceso natural y normal, es por ello que durante mucho tiempo se le considero inevitable.

5.1.2 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN.

La corrosión suele clasificarse de dos maneras:

- Según el medio agresivo.
- Según la forma como esta se presente.

5.1.2.1 SEGÚN MEDIO AGRESIVO.

- Corrosión química o Seca: En este tipo de corrosión, la estructura se encuentra generalmente a altas temperaturas, libre de humedad y sin intercambio de electrones. El producto de esta corrosión puede ser un óxido no poroso que es protector del metal, puede también ser un óxido poroso que no es protector del material.
- Corrosión electroquímica o húmeda: Este tipo de corrosión se presenta en un medio iónico y se caracteriza por dos procesos dependientes que ocurren simultáneamente e lugares diferentes: Oxidación (en el ánodo) y Reducción (en el cátodo).

La condición necesaria y suficiente para que exista corrosión electroquímica es que estén presentes los siguientes cuatro elementos:

- Ánodo: Área donde la corriente sale del metal hacia el electrolito. Existe disolución del metal en forma de cationes, produciendo oxidación. Se produce corrosión.
- Cátodo : Área donde la corriente ingresa al metal a través del electrolito. Al captar electrones se produce la reducción. (Protección).
- Electrolito : Medio que transporta a los iones desde el ánodo al cátodo. (Medio corrosivo).
- Metal : Camino conductor o semiconductor que transporta de regreso a los Electrones desde el cátodo al ánodo. (Material corrosible).

5.1.2.2 SEGÚN LA FORMA.

Según su forma, la corrosión se puede clasificar en: Uniforme y Localizada. La corrosión

uniforme se caracteriza por un desgaste general de la superficie del metal, es la forma más común y benigna de la corrosión, un ataque de esta naturaleza permite calcular fácilmente la vida útil de los metales. La corrosión localizada se entiende como un ataque sobre la superficie del metal en áreas muy pequeñas, este ataque localizado origina agujeros o cavidades que se inician en la superficie del metal, este ataque se conoce como corrosión por picaduras y es el causante de las fugas en el cuerpo de la tubería.

5.1.3 CAUSAS DE LA CORROSIÓN.

El fenómeno de la corrosión es la respuesta a la tendencia natural que tienen los metales de regresar a su estado nativo. Este regreso a su estado natural está acompañado de un cambio en la energía libre del sistema, lo que corresponde al trabajo realizado o absorbido durante el proceso.

El proceso de corrosión, por lo tanto, supone un retroceso de los metales refinados a sus minerales de partida. La causa está ligada a la diferencia de energía libre entre metal refinado y el mineral de donde se ha extraído o de los compuestos que se forman como resultado de la corrosión.

5.2. CORROSION EN TUBERÍAS PARA AGUA POTABLE

La corrosión es un punto de gran influencia en los estudios de rehabilitación de tuberías para el transporte de agua potable, por esto se presentan los siguientes temas que en conjunto darán una visión amplia de la interrelación de los diferentes factores que intervienen.

Los temas en mención son:

- Suelos corrosivos.
- Tipos de materiales y tubería para acueducto.

- Tipo de junta de las tuberías.
- Accesorios para las tuberías.
- Revestimientos.
- Control de la corrosión.
- Causas de la corrosión.
- Medición y monitoreo de la corrosión.

5.2.1 SUELOS CORROSIVOS.

Son muy abundantes las estructuras metálicas enterradas, entre las cuales se encuentran las tuberías de conducción de agua potable, que en el caso de Bogotá suman en conjunto cifras realmente elevadas de varios cientos de kilómetros, de metal expuesto a la acción del suelo.

La corrosión externa o ataque a la pared exterior de los tubos enterrados, es producida o facilitada por la acción de los suelos en los cuales se desarrolla el trazado. Según sean tuberías de acero, hierro fundido, hierro dúctil o de cemento el fenómeno es diferente en cada caso.

El suelo es un sistema heterogéneo, formado por partículas de diversa forma y naturaleza, que van desde las arenas de partículas gruesas hasta las arcillas de características coloidales. Desde el punto de vista de su estructura física, el suelo es micro poroso, con poros capilares llenos de aire y / o humedad.

La resistencia eléctrica del suelo guarda relación con su composición y estructura. Las menores resistencias corresponden de ordinario a las arcillas, debido a su textura fina, compacidad y aptitud para conservar la humedad y las sales disueltas. Los iones disueltos de cloruros, sulfatos y bicarbonatos elevan la conductividad.

El terreno es heterogéneo, lo mismo a escala microscópica que macroscópica. En este ultimo caso, a consecuencia de cambios físicos, por ejemplo de densidad y cambios

químicos cuando se pasa de un estrato a otro.

La agresividad del suelo no es un parámetro fijo; antes de hablar de suelos corrosivos y no corrosivos, importa definir con precisión el estado físico del suelo (grado de compactación) en sus diferentes puntos, la orientación y emplazamiento de la estructura metálica respecto al nivel de saturación de agua del terreno, y el tipo de corrosión a temer.

5.2.1.1 AGRESIVIDAD DE LOS SUELOS

La agresividad del suelo se puede comenzar a determinar desde mucho antes de instalar la tubería, los trabajos topográficos, los estudios geológicos y la inspección del terreno previos a los diseños, son factores de gran ayuda en el control de la corrosión.

Estudio topográfico:

- Relieve: Puntos altos y secos, puntos bajos y húmedos.
- Ríos: Áreas húmedas.
- Estanques, ciénagas, lagos, otros bajos fondos.
- Estuarios, marismas, terrenos salinos.
- Zonas contaminadas por diversos efluentes.
- Depósitos de procedencia industrial.
- Proximidad a efluentes no estancos.
- Instalaciones industriales con corriente continua.
- Cruces con líneas eléctricas

Estudio geológico:

- Terrenos de poco riesgo: arenas, gravas, piedra, caliza.
- Terrenos de alto riesgo: margas, arcillas.
- Terrenos de altísimo riesgo: yesos, piritas, sales para industria,

combustible fósil.

- Hidrológica: terrenos impermeables, zonas acuíferas.

Inspección del terreno:

- Medidas de resistividad, toma de muestras para laboratorio.

Si los datos anteriores son tomados en los estudios preliminares, entonces se podrá tener una visión amplia sobre los problemas de corrosión que se puedan presentar.

5.2.2 TIPO DE MATERIALES Y TUBERÍAS PARA ACUEDUCTO.

Las tuberías utilizadas para acueductos se dividen en tres grupos: tuberías rígidas, tuberías flexibles y semirígidas. En el caso de Bogotá todos los anteriores se encuentran instalados en diferentes diámetros desde 16" hasta 78".

- Tuberías rígidas: Se define como conducto rígido aquel cuyos cambios por efectos de cargas externas, en cualquier sección transversal, no puede variar su dimensión vertical u horizontal en mas de 0.1%, sin causar al material grietas o roturas. Algunas tuberías de este grupo son asbesto cemento, hierro fundido, Hierro dúctil, Concreto reforzado sin cilindro, Concreto reforzado con cilindro, Concreto pretensado sin cilindro, concreto pretensado con cilindro. Fallan generalmente por rotura de la pared. De este tipo de tuberías, las que pueden presentar problemas de corrosión son las de hiero fundido, hierro dúctil, Concreto reforzado con cilindro, concreto pretensado con cilindro; problema presentado principalmente por daño en los revestimientos.
- Tuberías flexibles: Se define como ducto flexible aquel de paredes delgadas cuyos cambios por efecto de las cargas exteriores, pueden hacer variar su dimensión vertical u horizontal en mas de 3.0 %, antes de causar al material grietas o roturas. Tuberías de este tipo son: Acero, PVC, Polietileno de alta densidad y Fibra de vidrio. Fallan generalmente por flexión y dependen exclusivamente de su resistencia para soportar

las cargas externas. Las tuberías de acero son las afectadas por corrosión, ocasionada principalmente por daño en el recubrimiento.

- Tuberías semirígidas: Son elementos con un comportamiento intermedio entre los dos anteriores. La principal tubería de este tipo es la fabricada con cilindro de acero, refuerzo con varilla enrollada helicoidalmente y recubrimientos interior y exterior en mortero de cemento. Cuando se presentan daños en los recubrimientos la tubería es atacada por la corrosión.

5.2.2.1 TUBERIAS INSTALADAS EN LA RED DE BOGOTA.

De acuerdo con el inventario realizado, para la red matriz del acueducto de Bogotá D.C. se encontraron varios tipos de tuberías los cuales cumplen con distintas normas de fabricación, las que se indican a continuación ver plano JR-052-GEN-003-E del anexo 16:

1. AWWA C301 o PCCP.
2. AWWA C303 o CCP.
3. AWWA C200 o Acero.
4. AWWA C110 o Fundición Gris.
5. AWWA C400 o Asbesto Cemento.

5.2.3 TIPOS DE JUNTA O UNIONES.

Entre las uniones más comunes para conectar tubos con tubos y tubos con accesorios como válvulas, que se encontraron tenemos:

1. Espigo-campana con espigo de caucho.
2. Campana-extremo liso con empaque de caucho o calafateado. Unión bridada.
3. Unión mecánica.
4. Unión soldada.- otras uniones.

Las uniones entre segmentos de tubería, pueden generar corrosión por materiales disímiles, en el caso de los acoples de hierro dúctil y acero; en las juntas bridadas la corrosión se puede dar por las rendijas entre cara de bridas o en las roscas de los tornillos; En las uniones mecánicas también se presenta la corrosión en la tortillería y en las uniones soldadas la corrosión se puede dar sobre el cordón de soldadura o en la zona crítica de afectación por calor.

5.2.4 ACCESORIOS

Para las tuberías en general existen una serie de accesorios que complementan su instalación y su funcionamiento. Dentro de los accesorios de instalación encontramos, codos en varios grados, reducciones, tees, yees y manguitos de ajuste, también encontramos accesorios especiales como uniones de reparación y galápagos de derivación. Estos accesorios pueden ser del mismo material del tubo o de diferente material como los accesorios de fundición que se emplean en las tuberías de asbesto-cemento. La fabricación de estos accesorios es normalizada, en las normas AWWA se encuentran las indicaciones para fabricar los accesorios con las dimensiones y características que cada proyecto requiera.

Otro tipo de accesorios son los de regulación y control como válvulas y medidores que requieren de una especial instalación, en estos casos se puede requerir salidas laterales sobre la tubería y extremos especiales, para prevenir la aparición inesperada de estos problemas es recomendable realizar un despiece completo de la línea a construir. Cuando en campo se deben hacer trabajos de ajuste de longitudes, salidas sobre tubería o cualquier otro trabajo distinto al de instalación normal, los costos se incrementan y se corre el riesgo de no alcanzar con los niveles de calidad requeridos, estos inconvenientes hay que tratar de preverlos desde el mismo diseño.

En todos los accesorios metálicos empleados en la instalación y control de las tuberías se presenta corrosión en alguna de sus múltiples formas y auspiciada por malos

recubrimientos, humedad, ataques ácidos etc..

5.2.5 REVESTIMIENTOS.

Para retardar la corrosión, se aumenta la homogeneidad del metal en el proceso de fabricación, o se protege el tubo con una capa de material resistente o se forman aleaciones especiales, o se trata el agua que va a estar en contacto con el metal.

Las aleaciones del hierro y el acero, con el cobre, con el níquel, estaño o cromo, son más resistentes a la corrosión, que aquellos solos.

Los recubrimientos usados para la protección exterior de las tuberías de hierro y acero son: los materiales de asfalto o alquitrán, la galvanización, la pintura, esmaltes y mortero de cemento. Es más importante darles protección a las tuberías de acero que a las de fundición. Las pinturas protectoras contra la corrosión se fabrican de pigmentos metálicos, generalmente plomo o cinc. También se emplean los revestimientos con plásticos de resinas poliéster, polietilenos cloruros de polivinilo.

5.2.6 CONTROL DE LA CORROSIÓN.

En el ámbito mundial, diversos son los métodos que se aplican para controlar la velocidad de corrosión de una estructura, los que tienen en común los siguientes objetivos:

- Que no intervengan en los procesos productivos.
- Factibles de ser instalados en forma técnica y económica.
- Fáciles de instalar, controlar y mantener.
- Expectativa de vida útil acorde con la instalación.

Según sea la estructura a proteger y el medio agresivo que la rodea, los métodos para el control de la corrosión se pueden agrupar de las maneras que se describen a

continuación:

- Control de las variables del proceso. Se debe velar por no exceder las variables del diseño, como temperatura, presiones, velocidad de fluido y concentraciones.
- Marginación del medio agresivo. Eliminar el electrolito agresivo de la estructura. Se crean atmósferas inertes, rellenos de contorno en instalaciones subterráneas, extracción de vapores y de humedad ambiente.
- Diseño estructural. El diseño estructural debe considerar la evacuación natural del medio agresivo, permitiendo además las medidas rutinarias para el mantenimiento de los revestimientos anticorrosivos.
- Selección de material. El material metálico que se seleccione para la construcción de una estructura debe ser el que resulte ser el más económico pero que además sea capaz de soportar la agresividad del medio corrosivo y las condiciones de operación.
- Protecciones pasivas. El objetivo de este tipo de protecciones es marginar al medio agresivo de la estructura que se desea proteger. Para tal objeto, se aplican revestimientos anticorrosivos y / o inertes sobre la estructura de modo que la reacción del proceso catódico permanezcan bloqueadas. Dentro de este método se incluyen las protecciones por metalizado, los revestimientos cerámicos y los vidriados.
- Protecciones electroquímicas. Estos métodos consisten en controlar la corrosión recurriendo a una polarización extrema de la estructura a proteger utilizando corriente eléctrica. Con éstos, se consigue una notable disminución de la velocidad de corrosión a través de una pasivación de la estructura aplicando protección anódica, o la inmunidad de ésta frente a la corrosión aplicando protección catódica. En los dos casos, el objetivo es disminuir la densidad de la corriente de corrosión.
- Inhibidores de corrosión. Son sustancias o compuestos químicos que agregadas en pequeñas concentraciones al medio agresivo, disminuyen la velocidad de corrosión al

reducir la agresividad del electrolito, obstruyendo las reacciones de corrosión, tanto por reducir la probabilidad de su presentación como por reducir la velocidad de ataque, o ambas a la vez.

5.2.6.1 PROTECCIÓN CONTRA CORROSIÓN EN LA RED MATRIZ.

Las tuberías instaladas para la red matriz en Bogota D.C. son principalmente de las normas AWWA C301 y AWWA C303, que en su pared están conformadas por cilindro de acero y varilla enrollada helicoidalmente, sus extremos son espigos y campanas con empaquetadura de caucho, lo que hace que esta tubería no tenga continuidad eléctrica; su protección contra la agresividad del suelo esta dada por su revestimiento en mortero de cemento, estas tuberías no tienen ninguna protección adicional.

El otro gran grupo de tuberías son las de norma AWWA C200 con recubrimientos C203 (esmaltes reforzados) o C205 (Mortero de cemento). Estas tuberías son con junta soldada presentando continuidad eléctrica, las que tienen revestimientos de esmalte deben tener protección catódica y estaciones de monitoreo que deben ser instaladas simultáneamente con la tubería, esto por normas y recomendaciones de la NACE.

En el caso de tuberías revestidas con mortero, el revestimiento mantiene un ambiente altamente alcalino en los alrededores de la tubería, con un pH aproximado de 12.5, lo cual previene muy bien la corrosión, por lo tanto, para las tuberías de acero revestidas con mortero de cemento, se debe instalar un sistema de monitoreo y prever los sitios para la instalación del sistema de protección catódica. Si con el monitoreo y ensayos posteriores se ve la necesidad de instalar y energizar el sistema se hará de lo contrario no. En tuberías con recubrimiento de mortero no se requiere que los sistemas de protección catódica se instalen simultáneos con la tubería. Entre los puntos de monitoreo Se deben tener estaciones para la medida de potencial y corriente, al igual para los cruces con otras tuberías y para el control de elementos aislantes; la cantidad de cada uno de los puntos de monitoreo se determina de acuerdo con la longitud de tubería instalada.

En Bogotá, a las líneas que cuentan con sistemas de protección catódica instalado no cuentan con control continuo y programado por parte de la EAAB. En el plano JR-052-GEN-010-E del anexo 16 se resaltan las líneas con protección catódica instalada, las cuales se relacionan a continuación:

- Línea a Suba BIV60092 \varnothing 60"
- Línea Silencio - Cazucá BIV42074 \varnothing 42"
- Silencio-Vitelma BIV 60086 \varnothing 60"
- San Diego-Zona intermedia I BIV48100 \varnothing 48"
- Conducción Funza-Madrid-Mosquera RM30015 \varnothing 36".
- Línea Silencio - Casablanca BIV4842099 \varnothing 42" y 48".

En el Anexo No. 13 se presentan las copias del último control realizado en el año de 1998; no se encontraron registros realizados en fechas más recientes, por lo que se asume que el mismo no se ha vuelto a realizar.

5.2.7 CAUSAS DE LA CORROSIÓN

A continuación se presenta para cada uno de los tipos de tubería las causas de la corrosión y se mencionan algunos puntos considerados de importancia.

5.2.7.1 TUBERÍAS DE FUNDICIÓN GRIS O DE HIERRO DÚCTIL.

Debido a lo complejo del fenómeno de la corrosión, no se puede establecer un método único e infalible para evaluar las condiciones que afectarían a las tuberías enterradas. La "Cast iron pipe research association" recomienda hacer una valoración de la agresividad de los suelos, teniendo como guía el método de los 10 puntos.

5.2.7.2 TUBERÍAS DE ACERO, CCP Y PCCP.

Las tuberías de acero normalmente llevan un revestimiento tanto interior como exterior para protección contra la corrosión; no se recomienda el empleo de tubos de acero desnudo en instalaciones enterradas.

El potencial de corrosión exterior de las tuberías de acero es difícil de determinar exactamente, es necesario efectuar una serie de análisis físicos y químicos de los terrenos donde van a ser instaladas, tales como resistividad del terreno, la humedad, presencia de cloruros y sulfatos, el pH; se debe estudiar también las interferencias originadas por protecciones catódicas instaladas en las cercanías, otro factor que se debe tener en cuenta es el de las corrientes errantes cuando cerca de la línea se tienen trenes eléctricos, equipos de soldadura, sistemas de transmisión eléctrica.

En las tuberías de acero recubiertas con mortero, en las PCCP y en la CCP, es muy importante el pH del suelo ya que la acidez del suelo va eliminando la alcalinidad del mortero y por lo tanto la protección que este da al acero.

En las tuberías PCCP, se presentó una degradación del pH del mortero inferior en el exterior del tubo, afectando la pasivación sobre la varilla de alto tensionamiento, presentándose principios de corrosión, el hidrógeno procedente del proceso de hidrólisis del agua, ocasiona en la varilla una "fragilización por hidrógeno", dado como resultado la rotura de la misma y la pérdida de resistencia de la pared del tubo, terminando en su colapso.

5.3. EQUIPOS, PRUEBAS Y ENSAYOS PARA DETERMINAR LA CORROSIÓN DE TUBERÍAS

Tal como se ha mencionado hasta el momento el fenómeno de la corrosión en tuberías para transporte de agua potable abarca un universo variado de elementos y variables de

distinto índole y comportamiento la mayoría de ellos presentes en el caso específico de la red matriz de distribución del acueducto de Bogotá D.C. por tal motivo se ha considerado de especial atención su investigación y evaluación.

Bajo este punto de vista inicialmente se buscó, para la evaluación en el presente estudio, la inclusión de técnicas e ingenierías de investigación altamente desarrolladas en la industria petrolera mundial de manera que un diagnóstico del estado y evolución del fenómeno de corrosión en las tuberías involucrara a todos los diferentes tipos de tuberías instaladas, con diferentes tipos de revestimiento y extendida sobre las diferentes circunstancias que circundan la sabana de Bogotá D.C, en cuanto a suelos, geología, geotecnia y fenómenos antrópicos, lo cual alcanza una alta complejidad si a lo anterior agregamos las interferencias con otras tuberías de hidrocarburos y gas natural, redes eléctricas y telefónicas, canales colectores entre otros accidentes.

5.3.1 CORROSIÓN INTERIOR.

Con el fin de determinar la velocidad y morfología de la corrosión producida en el interior de la tuberías con alma de acero, se puede considerar el monitoreo interior de las mismas en los puntos más representativos como la parte inferior del tubo.

La técnica anterior sería complementada con la medición ultrasónica de espesores de pared del ducto, lo cual permitiría diagnosticar integralmente el estado mecánico del sistema y priorizar los sectores críticos para establecer los programas de rehabilitación pertinentes.

Para las tuberías con revestimiento en mortero tales como la PCCP, CCP y AWWA C200 C205 la metodología anterior puede ser complementada y efectuar una patología del concreto con el fin de encontrar su integridad como medio aislante.

Para lo anterior se deben tener como mínimo las siguientes actividades, dependiendo del tipo de material de la tubería:

1. Tuberías con revestimientos de asfalto y esmalte:

- Instalación de cupones: De baja presión, preferiblemente en la posición horaria de las seis, parte inferior del tubo.
- Toma de muestras de sólidos: Dispositivos para el muestreo de sólidos, su caracterización y granulometría.
- Accesorios para polarización lineal o Potentiodyne: Dispositivo para el levantamiento de curvas y determinar la velocidad de corrosión en la línea por la técnica mencionada.

Para todo lo anterior es necesario inspeccionar previamente las líneas y determinar la localización de los puntos de muestreo los cuales deben coincidir con sitios de fácil acceso como las cajas para válvulas. Los dispositivos pueden ser instalados con la línea en servicio mediante la técnica de "HOT - TAP", (perforar la pared de un tubo metálico para instalar una salida, sin suspensión de servicio).

A partir del tiempo cero, tiempo en que sean instalados los dispositivos, se requiere de recorridos cada mes, hasta completar cuatro, para realizar el monitoreo respectivo.

Con todo lo anterior se realizarían análisis de campo y laboratorio; con la toma de muestras de agua y sólidos se efectúan análisis físico - químicos como de pH, temperatura, sulfatos, carbonatos, ión ferroso, ión férrico, metales, CO₂, O₂, H₂S y microbiológicos, determinación de bacterias aeróbicas y anaeróbicas; así como con los dispositivos instalados se determina el tipo y forma de la corrosión, cálculo de la velocidad y su morfología. Con la toma de espesores se registran los datos y se analizan comparándolos con los especificados en el diseño de las tuberías.

2. Tuberías con revestimiento en mortero de cemento:

Para esta clase de tubería, que corresponde al mayor porcentaje instalado en la red matriz y dentro de las que se encuentran algunas muy viejas se consideró lo siguiente:

- Inspección visual: Con el fin de observar el estado del concreto, agrietamiento, descarcaramiento u otra anomalía que permita deducir la migración de humedad hacia el acero y por lo tanto inducir las fallas por la presencia de Stress Corrosion Cracking.
- Muestreo y análisis del concreto: Para el análisis de pH, cloruros, bacterias, sulfuros y carbonatos.

5.3.2 CORROSIÓN EXTERIOR.

En este campo es importante tener en cuenta separadamente las líneas con protección catódica y sin protección catódica respectivamente.

5.3.2.1 LÍNEAS CON PROTECCIÓN CATÓDICA.

Se planteó el desarrollo de las siguientes actividades:

1. Levantamiento de los potenciales de protección catódica utilizando las técnicas tubo / suelo, estación / suelo, "instan ON/OFF" y Close Interval Survey - CIS, cada uno de ellos seleccionado previamente de acuerdo a la zona y tramo específico de tubería, así como calificación de interferencias e influencias de sistemas de protección catódica foráneos.
2. Pruebas para medición de espesores y estado del revestimiento. Para determinar los puntos de inspección se utilizaría la técnica DCVG " DC Voltaje Gradient", por medio de la cual se miden gradientes de voltaje que indican el sitio recomendado para la inspección.

Adicionalmente, para las unidades rectificadoras de corriente impresa se trato:

1. Inspección de las acometidas a tierra de alta y baja tensión de corriente alterna y continua respectivamente.
2. Inspección de la URPC, su sistema de rectificación e instrumentación de medición y control.
3. Evaluación de la vida remanente y de la eficiencia de las camas de drenaje de corriente.
4. Inspección de las estaciones de medición de potenciales, puentes eléctricos y camas anódicas de sacrificio.

Inspección y medición de continuidad de corriente en las juntas de aislamiento dieléctrico en equipos y bridas.

5.3.2.2 LÍNEAS SIN PROTECCIÓN CATÓDICA.

Actividades a desarrollar.

1. Levantamiento del perfil de resistividad continua por efecto electromagnético a diferentes profundidades; para clasificar el tipo de suelo, el nivel freático, presencia de otras líneas enterradas, obras civiles enterradas, rellenos sanitarios y/o desperdicios, de adecuación de suelos y la agresividad del suelo, complementándose con análisis físico - químico y microbiológico de suelos.
2. Inspección de los diferentes revestimientos aplicando la técnica DCVG y apiques para conocer el estado físico, determinar defectos, magnitudes y la corrosión catódica - catódica, anódica - anódica y catódica - anódica.
3. Estudio y medición de los diferentes revestimientos externos, para detectar defectos y fallas por microfisuración, pérdida de adherencia ínter cristalina y sustrato metálico.

4. Estudio de los revestimientos con morteros y agregados en cuanto a fallas y defectos por compuestos químicos y bacterias y el estudio de la pérdida de las propiedades químicas que afectan el pH y composición de la mezcla.
5. Evaluación de las interferencias y daños generados por campos inducidos y corrientes dispersas mediante técnica de análisis de Onda.

En cuanto a válvulas y accesorios además de las inspecciones visuales y mecánicas:

1. Medición de espesores en donde el material y las dimensiones lo permitieran.
2. Estado de la corrosión por aislamientos dieléctricos en bridas.

Para la realización de todas las inspecciones anteriores se tomaría como referencia y de acuerdo con las normas y recomendaciones de NACE Standard RP0169-92, ANSI NFPA NEC, AWWA o normas afines.

5.3.3 MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CORROSIÓN.

A continuación se presenta una relación general del equipo a utilizar para la realización de las pruebas, ensayos y monitoreos de las tuberías y accesorios de la red matriz tal como se acaba de describir:

- Localizador de tubería METROTEC.
- Equipo Para evaluación de revestimiento DCVG "DC Voltege Gradient".
- Equipo para medición de resistividad TINKER RASOR.
- Equipo para evaluación de la protección catódica y corrosión CIS "Close Interval Surrey", marca COREX.
- Rectificador de inspección técnica de medidas eléctricas en DC y AC, puesta a tierra.
- Multímetros digitales, marca BECKAM.
- Multímetros digitales con memoria de 200 KB, marca COREX.
- Amperímetros de DC y AC, marca FLUKE.

- Electrodo de referencia Cobre - Sulfato, marca TINKER RASOR.
- Equipos para inspección de rectificadores URPC, camas anódicas y estaciones de prueba P/S.
- Equipos para inspección de revestimientos, marca COREX.
- Osciloscopio para formas de onda de voltaje.
- Equipos para toma de muestras para análisis de suelos, agua y producto de corrosión.
- Estuche para análisis de bacterias corrosivas en aguas y suelos.
- Banco metalográfico portátil.
- Medidor de velocidad de corrosión por potencial mixto.
- Juego de instrumentos para evaluar corrosión en morteros y concretos.
- Interruptores temporizados de 40 amperios, marca COREX.
- Herramientas menores, calibradores, teléfonos o radios.
- Vehículos.

El tiempo para el desarrollo de este programa de inspección dependía básicamente de las variables a medir que como en el caso de medir la velocidad de corrosión se deben hacer mediciones cada treinta días y tomar un número de cuatro mediciones lo que representa un tiempo de cuatro meses para la toma de la información.

Luego de analizar la evaluación económica del anterior programa de investigación, el cual alcanzaba la suma de \$.250.000.000,00 y la disponibilidad de recursos contemplados para su ejecución se hizo necesario el rediseño del mismo, ajustándolo y haciéndolo consecuente con la destinación económica disponible para el efecto.

Por tal motivo se procedió a definir lo mínimo y esencialmente necesario para adelantar el estudio sobre el fenómeno de corrosión, determinando en primera instancia no vincular el fenómeno que se pueda dar al interior de las tuberías, en vista principalmente de la calidad del agua, lo anterior fue soportado con las conclusiones obtenidas de las entrevistas sostenidas, a varios niveles desde técnico hasta directivo, con diferentes funcionarios y exfuncionarios de LA EMPRESA.

Se determinó que el factor de mayor relevancia sobre éste aspecto de corrosión para las

líneas matrices de acueducto de Bogotá D.C, es el relacionado directamente con la agresividad del suelo circundante a las tuberías, ocasionada por las características y algunos fenómenos que en él se suceden como variación del nivel freático y reacciones químicas.

Se propone entonces un programa para la evaluación de la agresividad del suelo por donde se encuentran instaladas las tuberías matrices de acueducto, basado en la metodología de determinación y calificación de los parámetros que permiten realizar un análisis de su influencia sobre el deterioro de las tuberías desde el punto de vista del fenómeno de corrosión.

Este programa incluye la toma de muestras para la realización de una serie de ensayos necesarios para la aplicación de la metodología de análisis conocida como el Método de los 10 puntos.

5.3.4 PROGRAMA DE TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYOS DE LABORATORIO A EJECUTAR EN EL ESTUDIO

Con el fin de determinar la agresividad del suelo circundante donde se encuentran instaladas las tuberías con revestimientos de mortero de cemento y con el objeto de efectuar un análisis de su influencia y los posibles efectos sobre el deterioro de la tubería desde el punto de vista del ataque por corrosión a continuación se presenta una programación para la toma de muestras y la realización de una serie de ensayos que indican las características de los suelos, que se encuentran en el medio donde fueron instaladas las tuberías.

5.3.4.1 PARÁMETROS A ANALIZAR.

Los parámetros a determinar para el suelo circundante a este tipo de tuberías son los siguientes:

- Contenido de Cloruros.
- Contenido de Sulfatos.
- pH.
- Resistividad Eléctrica.
- Humedad.

En la Tabla No. 5.3.1 se presentan los criterios para evaluación de los parámetros seleccionados.

Tabla No. 5.3.1. Criterios para la evaluación de los parámetros seleccionados

CONDICIÓN	CRITERIO
Suelos con alto contenido de cloruros	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos sujetos a ciclos de húmedo y seco • Suelos que contienen cantidades sustanciales de cloruros • Suelos con resistividades menores de 1500 ohm-cm.
Suelos con alto contenido de sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos que contienen más del 0.2% de iones de sulfato solubles en agua. • Aguas subterráneas que contienen más de 2000 ppm de ión sulfato.
Suelos ácidos	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos con PH menor de 5
Resistividad Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Suelos con resistividades menores de 1500 ohm-cm.
Humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Pobre drenaje, continuamente mojado • Regular drenaje, generalmente húmedo • Bien drenado, generalmente seco

5.3.4.1.1 Contenido de Cloruros.

Los iones de cloruros en concentración suficiente pueden destruir la pasivación del acero embebido en concreto y causar corrosión. Para que esto ocurra debe haber también presencia de oxígeno en la superficie de acero.

En suelos con alto contenido de cloruros y con ciclos de mojado y secado (nivel freático variable), en la zona de la tubería, pueden resultar altas concentraciones de cloruros y

presencia de oxígeno libre en el mortero de revestimiento y eventualmente en la superficie del acero. Esto es más probable de ocurrir en suelos que tienen resistividades menores que 1500 ohm-cm, usualmente indicando una alta concentración de sales solubles tales como cloruros.

5.3.4.1.2 Contenido de Sulfatos

Los suelos con altas concentraciones de sulfatos de sodio, magnesio o calcio, son llamados suelos sulfato o álcali. Tales suelos pueden atacar químicamente las estructuras de concreto, particularmente aquellas enterradas en el suelo donde la acción capilar puede aumentar las altas concentraciones de sulfatos en el concreto sobre el nivel del suelo.

Para las tuberías instaladas en suelos que contienen más del 0.2% de iones sulfato solubles en agua o en aguas subterráneas que contienen más de 2000 ppm de ión sulfato se pueden necesitar protecciones adicionales en las tuberías.

5.3.4.1.3 Ión Hidrógeno o pH

El pH es una medida de la actividad del ión hidrógeno o intensidad en un ácido. El menor valor del pH es el medio más ácido

Cuando el pH del suelo es menor de cinco se pueden requerir de protecciones adicionales en las tuberías.

5.3.4.1.4 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica del suelo es una medida de la resistencia efectiva del suelo a la conducción de la corriente eléctrica a través de una distancia y es recíproca con la

conductividad. Es una medida en Ohm-centímetros.

5.3.4.1.5 Humedad

Indica la mayor o menor cantidad de agua presente en el suelo

5.3.4.2 CRITERIO DE ANÁLISIS

Cada uno de los parámetros anteriores es calificado con un puntaje y la suma aritmética de todos los puntajes, incluyendo los negativos, indicará la mayor o menor agresividad del suelo con relación a la estructura enterrada. Esta metodología se conoce, como ya se indicó con el nombre del Método de los "10 puntos", se presenta un ejemplo de evaluación en la Tabla No. 5.3.2.

Tabla No. 5.3.2. Rango de valoración de los parámetros empleados en el Método de los 10 puntos

	PARÁMETRO	PUNTOS
p.H	0 - 2	5
	2 - 4	3
	4 - 6,5	0
	6,6 - 7,5	0
	7,6 - 8,5	0
	> 8,5	-3
RESISTIVIDAD Ohm-cm.	< 700	10
	700 - 1000	8
	1000 - 1200	5
	1200 - 1500	2
	1500 - 2000	1
	> 2000	0
HUMEDAD	Pobre drenado, continuamente mojado.	2
	Regular drenaje, generalmente húmedo	1
	Bien drenado, generalmente seco	0

El resultado final puede tener la siguiente interpretación aproximada:

- 9 - 10 Altamente agresivo
- 7 - 8 Muy agresivo
- 5 - 6 Medianamente agresivo
- 3 - 4 Poco agresivo
- 0 - 2 No agresivo

5.3.4.3 TOMA DE MUESTRAS

Se tomarán muestras en distintos sitios previamente seleccionados, durante las inspecciones de campo, se realizarán sondeos para la toma de muestras por medio de barrenos, los sondeos se harán distantes cada 50 o 100 metros y a profundidad variable, por lo general entre 1,0 y 2,0 metros.

5.3.5 ENSAYOS DE LABORATORIO

Para la determinación de cada uno de los parámetros se desarrollaran los ensayos de laboratorio descritos por las normas que se relacionan en la Tabla No. 5.3.3. En el Anexo No. 14 se adjuntan las normas relacionadas.

Tabla No. 5.3.3. Ensayos de laboratorio para determinar agresividad en suelos

PARÁMETRO	METODOLOGÍA
Contenido de Cloruros	Department of Transportation - Division of Construction - State of California - Test 422 - 1978
Contenido de Sulfuros	Department of Transportation - Division of Construction - State of California - Test 417 - 1978
pH	Department of Transportation - Division of Construction - State of California - Test 532 - 1978
Resistividad Eléctrica	Department of Transportation - Division of Construction - State of California - Test 532 - 1978
Humedad	

5.3.6 LOCALIZACIÓN DE LOS MUESTREOS

En la Tabla No. 5.3.4 se relacionan las líneas y sitios previamente seleccionados para la realización de la toma de muestras.

Tabla No. 5.3.4. Líneas y sitios seleccionados para la toma de muestras

No.	LÍNEA	φ pul g	LONG. Total mts	MATERIAL	LUGAR	LONG. muestreo mts.	No. SONDEO
1	Tibitóc- Usaquén	60	36164.74	AWWA C303	Al Norte de la calle 100	800	8
					Aut. Norte - Calle 122	100	2
					Av. 37 entre Calle 80 a 88 ^a	1500	16
2	Tibitó- Casablanca	78	52694.83	AWWA C301	Av. Boyacá entre Aut. Medellín y Ferrocarril. Costado norte y sur del canal San Francisco	100	1
					Norte de la Av. De las Américas sobre el separador	400	4
					Pantano La Chucua	150	2
					Av. Américas con Av. Boyacá- Cruce con tubería de gas	50	1

No.	LÍNEA	φ pul g	LONG. Total mts	MATERIAL	LUGAR	LONG. Muestreo mts.	No. SONDEO
3	Interconexión Calle 92 - Calle 192	60	4110.47	AWWA C303	Aut. Norte Calle 119	400	4
					Aut. Norte Qda. Los Molinos	100	2
					Aut. Norte Calle 116	100	2
4	Carretera central -Cra 7 - Calle 100 a 170	24	2732.13	AWWA C303	Av. 7 entre Calle 152 y 159	1500	15
5	Vitelma - Jalisco	24	8732.3	AWWA C303	Calle 45 sur Cra. 16 A	800	8
6	Alpes - Quindío	24	1560.0	AWWA C303	200 mts. Al Este del tanque	400	4
7	Vitelma - Diana Turbay	20	10526.06		Guacamayas - Atenas	400	4
8	Línea Calle 100 - Av. Suba	16	3878.59	AWWA C303	Av. Suba	200	4
TOTALES			120399.12			7000.0	77

Para la selección de los sitios de ensayo, se tuvo en cuenta la presencia de problemas repetidos en la historia de la tubería.

Estos resultados, obtenidos a lo largo de la franja de instalación permiten dar una idea de lo que puede acontecer con una estructura enterrada, como es el caso de una tubería y ayudan para hacer un diagnóstico general y tomar decisiones que permitan un buen desempeño de la línea a través del tiempo.