

Identificación de los Mecanismos de Daño por Corrosión Externa en Ductos de Transporte

¹A. Pellicano, ²J.P. Rossi.

¹ Sintec S.A. - Colón 3083 8° Piso - Mar del Plata – Bs. As. – Argentina – apellicano@sintecsa.com.ar

² Sintec S.A. – Colón 3083 8° Piso - Mar del Plata – Bs. As. – Argentina – jprossi@sintecsa.com.ar

Sinopsis

Los ductos de transporte en servicio en la industria del petróleo y el gas están sujetos a diferentes riesgos que pueden comprometer su integridad, y que son generados por amenazas de distinto origen: diseño, construcción, operación, terceros, amenazas naturales y mecanismos de daño (MDD). En este sentido, la corrosión juega un rol fundamental en la aparición eventual de una falla en las líneas, requiriendo una importante asignación de recursos económicos destinados para su control y mitigación, que pueden llegar a comprometer otros planes de inversión de tipo productivo.

En este sentido es fundamental desarrollar estrategias de identificación y cuantificación de los diferentes mecanismos de daño presentes, con el objetivo de seleccionar métodos efectivos de prevención.

Dada la reducida cantidad de agua presente en el fluido en condición de venta, se reduce la probabilidad de ocurrencia de fallas por corrosión interna, y por ende, adquiere una mayor relevancia relativa el desarrollo de procesos corrosivos externos.

En el caso de observarse corrosión externa presente en los ductos es necesario identificar con precisión el tipo y origen del ataque. Durante los cateos de verificación directa se deberán seguir los pasos detallados a continuación, necesarios para poder realizar un estudio sistemático del proceso de degradación presente:

- Condición del revestimiento en la zona de la falla,
- Caracterización química cualitativa in situ de los depósitos y productos de corrosión presentes,
- Evaluación de la zona de interfase: metal/revestimiento,
- Medición de los parámetros complementarios relevantes,
- Estudio y evaluación de la morfología del ataque,
- Identificación del MDD activo.

Una vez caracterizado el mecanismo de degradación presente, será necesario evaluar el nivel de criticidad asociado a cada defecto, estableciendo las acciones de acondicionamiento necesarias para garantizar la operación segura del ducto. El análisis pormenorizado de toda la documentación recolectada permitirá *a posteriori* una evaluación exhaustiva de las condiciones que propiciaron el desarrollo de los MDD de daño presentes en el ducto, y la elaboración de una estrategia combinada de monitoreo, inspección y mitigación que asegure la identificación y caracterización temprana de nuevos mecanismos de degradación. Estas acciones debe estar enmarcadas en una política de gerenciamiento de tipo proactivo, que permita asegurar que la gestión de integridad y corrosión esté adecuadamente soportada desde el punto de vista técnico y que los recursos disponibles se direccionen y optimicen en función de la mitigación de los riesgos principales.

Palabras clave: Corrosión externa – Gas – MDD – Petróleo

1. Introducción

El presente trabajo está orientado a establecer los pasos necesarios para la correcta evaluación e identificación de los defectos por corrosión externa presentes en las cañerías. El proceso consiste en una evaluación sistemática de todos los factores condicionantes del proceso corrosivo en desarrollo.

Una vez asegurada la condición requerida de la cañería para las tareas de movimiento de suelo, realizada la apertura de la zanja y establecida la condición segura de la misma, es necesario realizar una evaluación

directa minuciosa de la cañería expuesta, realizando un registro fotográfico completo de todo el proceso, poniendo especial detalle en la condición en que se encuentra la cañería inspeccionada.

Se procederá luego a realizar los estudios de identificación cualitativa de los productos de corrosión y/o depósitos presentes en la interfase entre el metal y el revestimiento, y que permitirán *a posteriori* una validación de las causas que generaron el desarrollo de los procesos de degradación presentes. Dado que la corrosión es un proceso de naturaleza superficial, esta etapa adquiere una relevancia fundamental en la comprensión adecuada de todo el proceso en desarrollo.

Se continuará luego con la evaluación del revestimiento, estableciendo el estado en que se encuentra, verificando en forma cualitativa o cuantitativa el nivel de adherencia que presenta.

Se procederá entonces con la evaluación de la morfología de los defectos, indicando la geometría y apariencia de los mismos. La utilización de END (ensayos no destructivos) permite el análisis detallado de los defectos presentes, necesarios para establecer el nivel de criticidad asociado a cada defecto y las acciones de acondicionamiento requeridas en cada caso.

2. Desarrollo

2.1. Inspección y registro fotográfico

El paso inicial del proceso de estudio y evaluación de los defectos externos presentes en las cañerías, comienza con la documentación de las características topográficas y geológicas de la zona de intervención, tomando un registro fotográfico previo al inicio de la excavación, y una vez efectuada la zanja, del perfil de la excavación (Fotografía 1).



Fotografía 1. Vista general de la zona correspondiente a la incursión previo al zanqueo y foto del perfil de la excavación.

2.2. Características químicas y físicas del suelo

La agresividad del suelo desde el punto de vista de la susceptibilidad a la presencia de ataque corrosivo está asociada a una serie de parámetros que tienen una incidencia directa en las velocidades de corrosión esperadas en dicho suelo. Entre los parámetros más importantes a relevar se encuentran: la resistividad, el pH, el potencial redox, y el contenido de sales solubles.

2.2.1. **Tapada:** la profundidad a la cual se encuentra ubicado el caño establece la posibilidad de encontrar bacterias de tipo aeróbicas o anaeróbicas en la proximidad del caño. Es sin embargo importante destacar que la sola profundidad no es determinante ya que pueden existir colonias de bacterias anaeróbicas por debajo de colonias de bacterias aeróbicas, si las condiciones del suelo son las adecuadas para propiciar el crecimiento bacteriano.

2.2.2. **Resistividad del suelo:** Es uno de los parámetros más ampliamente utilizado para caracterizar la agresividad del suelo. Sin embargo no da ninguna indicación directa sobre variaciones en el pH, nivel de aireación, existencia de actividad y la presencia de ataque corrosivo microbiano. Los suelos agresivos se caracterizan por valores de resistividad menores a 2300 Ωcm (ver Tabla 1).

Tabla 1: Niveles de resistividad.

Resistividad / Ω cm	Agresividad del Medio
< 900	Severamente corrosivo
900 a 2300	Muy corrosivo
2300 a 5000	Moderadamente corrosivo
5000 a 10000	Poco corrosivo
> 10000	Muy poco corrosivo

- 2.2.3. **pH:** este un parámetro indicador del grado de acidez del medio y se define como, $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$, en donde $[\text{H}^+]$ constituye la concentración de protones del medio. La relación entre este parámetro y la tendencia de un metal a corroerse fue establecida por Pourbaix en 1965, quien construyó una serie de diagramas que vinculan el potencial del metal con el pH. En estos diagramas se definen regiones en las cuales el metal es inmune frente a la corrosión, zonas en las que el metal se corroe activamente y zonas en las cuales el metal está pasivo (protegido por una capa de óxido que limita la velocidad de corrosión). Este tipo de diagrama puede construirse a partir de correlaciones teóricas o mediante curvas potencial-corriente. De esta manera se asocia al pH con el riesgo de que ocurra ataque sobre la cañería enterrada. En la tabla 2 se muestra la correlación entre el pH y el riesgo de que ocurra ataque corrosivo:

Tabla 2: Valor del pH.

pH	Acidez del suelo	Agresividad del suelo
< 4	Acido Muy Fuerte	Altamente Agresivo
4 a 4.5	Acido Fuerte	
4.5 a 5	Acido	
5 a 6	Acido Moderado	
6 a 6.5	Levemente Acido	Bastante Corrosivo
6.5 a 7.5	Neutro	Poco Corrosivo
7.5 a 8.5	Levemente Alcalino	
> 8.5	Alcalino	Depende del material

- 2.2.4. **Potencial Rédox:** es una medida que permite establecer la capacidad oxidante y reductora de un suelo (ver Tabla 3). El valor de potencial rédox sirve para evaluar la susceptibilidad a que se presente ataque microbiológico. Un valor de potencial bajo es indicativo de un suelo con un bajo contenido de aireación, y por ende, susceptible al desarrollo de colonias anaeróbicas, como las bacterias sulfato reductoras (SRB).

Tabla 3: Potenciales Redox.

Rango de Potenciales Redox* / mV	Grado de corrosividad
< 100	Susceptible
100 a 200	Moderadamente Susceptible
200 a 400	Levemente Susceptible
> 400	No Susceptible

* El potencial redox se determina a partir de la siguiente expresión:

$$E_h = E_p + E_r + 60 (\text{pH} - 7)$$

Donde:

E_h : es el potencial rédox del suelo, versus SHE (electrodo estándar de Hidrógeno)

E_p : es el potencial del electrodo de platino

E_r : es el potencial del electrodo de referencia

pH: es el pH del suelo.

- 2.2.5. **Sales:** la salinidad de un suelo está determinada por el porcentaje de iones solubles en agua que posee. En climas templados con lluvias moderadas, la solución del backfill es relativamente diluida, con porcentajes de sales que oscilan entre 80 ppm y 1500 ppm. En regiones lluviosas, la concentración de sales disminuye como resultado de la continua circulación de líquido, mientras que en zonas secas el porcentaje de sales es elevado, fundamentalmente en las capas superiores debido a la circulación por evaporación superficial. En general, las especies catiónicas más comunes son potasio, sodio, magnesio y calcio. Las sales de estos cuatro elementos son aceleradores de la velocidad de corrosión de los aceros, con excepción de los carbonatos y óxidos de calcio y magnesio en medio alcalino (suelos calcáreos), que son insolubles y forman capas protectoras sobre la superficie metálica. Las especies aniónicas son las más importantes desde el punto de vista de la corrosión, principalmente los cloruros y sulfatos, que resultan muy perjudiciales ya que favorecen ataque localizado (fundamentalmente picado). Por esta razón, es de suma importancia la cuantificación de estos aniones para determinar el nivel de agresividad del medio (Tabla 4).

Tabla 4: Concentración de cloruros y sulfatos.

Cloruros / ppm	Sulfatos / ppm	Agresividad del suelo
> 2500	> 5000	Altamente agresivo
500 a 2500	1000 a 5000	Agresivo
100 a 500	200 a 1000	Moderado
< 100	< 200	Levemente agresivo

- 2.2.6. **Humedad:** es el contenido de agua en el suelo. En suelos completamente secos no existe corrosión. El agua es necesaria para la ionización de las sales solubles presentes en el suelo, y para la difusión de las especies.

Como una guía general a las condiciones de humedad se puede utilizar la siguiente clasificación:

Suelo seco: falta de agua.

Suelo húmedo: ligeramente impregnado con agua o con otro líquido.

Suelo saturado: suelos que contienen todos sus vacíos totalmente ocupados por agua. Nota: se observa agua en el fondo de la zanja.

Suelo sumergido: por debajo del nivel freático.

- 2.2.7. **Composición del suelo:** es útil realizar una caracterización composicional rápida de los suelos.

Suelo calizo: tienen abundancia de sales calcáreas. Son de color blanco, secos y áridos.

Suelo pedregoso: formados por rocas de diferentes tamaños. No retienen el agua y no son buenos para el cultivo.

Suelo arenoso: están formados principalmente por partículas finas, no retienen el agua y no son buenos para la agricultura.

Suelo arcilloso: están formados por partículas muy finas, con mucha retención de agua. Humedecidas presentan propiedades de plasticidad, con considerable resistencia al secarse al aire.

Materia orgánica: de variados tamaños y en diversas fases de descomposición.

- 2.2.8. **Drenaje:** está asociado a la capacidad que tienen los suelos de retener el agua. El nivel de drenaje del suelo determina si el suelo es reductor (anaeróbico) u oxidante (aeróbico), lo que está asociado al tipo de ataque corrosivo que puede proceder sobre el caño enterrado.

2.3. Evaluación del revestimiento

- 2.3.1. **Tipo del revestimiento:** este parámetro está asociado al MDD que se puede presentar en la cañería enterrada.

- 2.3.2. **Estado del revestimiento (condición general y local, roto, arrugado, ampollado):** este aspecto condiciona el nivel de protección que efectivamente puede llegar a la superficie del caño y el tipo de ataque que puede ocurrir sobre el mismo.

Los revestimientos de base asfáltica, presentes en la mayor parte de los ductos de mayor antigüedad, con el tiempo en servicio se vuelven quebradizos. Las tensiones que ejerce el suelo tienden a despegar y a producir fallas localizadas en el recubrimiento. En el caso de suelos de baja

resistividad, los niveles de protección disminuyen, generando zonas en donde el ataque corrosivo se ve favorecido.

Los revestimientos en base a cintas son susceptibles a desprenderse en el tiempo, tanto sea por las tensiones generadas por el suelo, como por el despegue catódico, producido por la alcalinización de la interfase metal – revestimiento. Los sectores de mayor susceptibilidad al despegue son aquellos en donde se presentan irregularidades geométricas, zonas de transición y de solapamiento de la cinta con otros revestimientos.

- 2.3.3. **Adherencia:** la efectividad de un recubrimiento depende en gran medida de resistencia al despegue que presente en las zonas de falla. Un revestimiento que permanezca firmemente adherido a la superficie metálica y que no posea defectos (poros, fallas, roturas), resistirá cualquier tipo de corrosión, independientemente de sus propiedades. Es importante resaltar que el nivel de adherencia que presenta cualquier tipo de revestimiento es altamente dependiente del grado de preparación superficial obtenido previo a su aplicación y de la calidad de la aplicación. Sin embargo, todo recubrimiento experimenta en el tiempo cierto grado de despegue, y por ende, es de vital importancia evaluar tanto el grado de adherencia como el comportamiento de la zona despegada frente a la presencia de agentes agresivos (sales solubles, humedad retenida, presencia de bacterias).

2.4. Análisis de los productos de corrosión y/o depósitos

2.4.1. Análisis Químico Cualitativo

La determinación de las especies químicas presentes en la interfase metal revestimiento es un factor importante en la caracterización del tipo de ataque presente sobre la superficie del caño. Los productos de corrosión y/o depósitos extraídos de esta zona pueden ser identificados cualitativamente, analizando una combinación de color, propiedades magnéticas y reacciones con una solución de ácido clorhídrico diluido (Fotografía 2). En caso de ser necesario es posible tomar y conservar adecuadamente las muestras para su estudio posterior en el laboratorio. En la Tabla 5 se presentan depósitos y productos de corrosión típicos:

Tabla 5: Identificación de productos de corrosión y depósitos.

COMPUESTO	IDENTIFICACIÓN
<i>Óxido de hierro</i>	Rojo/naranja.
<i>Magnetita</i>	Opaco/negro brillante. No reacciona con ácido clorhídrico. El producto es magnético.
<i>Carbonato de hierro (siderita)</i>	Opaco/negro brillante. Reacción amarilla efervescente al agregar ácido clorhídrico.
<i>Sulfuro de hierro</i>	Opaco/negro brillante. Olor a huevo podrido al agregar ácido clorhídrico.
<i>Carbonato de hierro</i>	Blanco/gris claro. Reacción amarilla efervescente al agregar ácido clorhídrico.
<i>Carbonato de calcio</i>	Blanco/gris claro. Efervescencia clara al agregar ácido clorhídrico.



Fotografía 2: Evaluación cualitativa de productos de corrosión con el agregado de ácido.

2.4.2. Análisis Bacteriológico

Es importante efectuar un análisis bacteriológico sobre muestras de suelo y agua extraídas de la zona de estudio, fundamentalmente en el caso de encontrar parámetros asociados al ataque corrosivo de tipo microbiano (morfología de ataque corrosivo, presencia de sulfuro en los productos de corrosión, olor a huevo podrido en agua retenida).

Es necesario disponer de un procedimiento de extracción de la muestra a analizar, en donde se detalle el material y los pasos requeridos, efectuando la inoculación ni bien se haya obtenido la muestra para evitar la desecación de la misma.

En todo el proceso debe evitarse al máximo la contaminación de la muestra, evitando tocar la muestra o biopelícula con las manos o herramientas que no estén esterilizadas.

2.5. Parámetros asociados a la cañería

2.5.1. **Temperatura del caño:** dado que todo proceso electroquímico es activado térmicamente, es necesario conocer la temperatura de la cañería para poder determinar la incidencia de esta variable en la propagación del ataque corrosivo.

2.5.2. **Potencial:** la medida de potencial es un parámetro que permite aproximar el nivel de protección real de la cañería (Potencial OFF) en la zona bajo estudio.

2.6. Mecanismos de corrosión externa típicos en ductos enterrados: morfología de ataque

Como paso inicial en el proceso de estudio es necesario establecer los sistemas y las condiciones a evaluar, considerando los siguientes aspectos:

2.6.1. Corrosión Uniforme

Este tipo de ataque corrosivo procede en forma uniforme sobre toda la superficie expuesta al medio agresivo, debido a que las áreas anódicas y catódicas se encuentran uniformemente distribuidas sobre la superficie. La velocidad de corrosión es homogénea sobre toda la superficie, por lo cual el espesor disminuye uniformemente en el tiempo. Si bien este tipo de ataque provoca una gran cantidad de pérdida de masa de material en el tiempo, es fácil de encontrar una solución para controlar este tipo de ataque.

Morfología asociada: este tipo de corrosión se caracteriza por la presencia de una morfología de ataque homogénea extendida sobre toda o gran parte de la superficie expuesta del material. En la Fotografía 3 se muestra la morfología del ataque.



Fotografía 3. Corrosión generalizada.

2.6.2. Picado (“pitting”, en inglés)

El picado se produce debido a la ruptura de una película de óxido protector presente en la superficie del acero. Se origina principalmente por la presencia en el medio corrosivo de aniones calificados como agresivos (principalmente aniones cloruros y sulfatos). Se genera, en consecuencia, un ataque altamente localizado (zona anódica), con una alta velocidad de penetración en áreas pequeñas que puede ser 10000 mayor que en el resto de la superficie (zona catódica). Esto genera que este tipo de ataque a menudo no sea detectado, aun utilizando tecnologías de alta sensibilidad como la herramienta inteligente y que sólo sean evidentes cuando aparecen pérdidas debido a la perforación de la pared de la cañería. Las picaduras pueden iniciarse en discontinuidades superficiales como inclusiones de sulfuros, defectos en los recubrimientos, depósitos de óxidos, escoria, barro, arena. Se encuentra en la literatura que hay tres tipos de picado diferentes, que aunque tienen morfología similar siguen mecanismos totalmente diferentes. De los tres mecanismos posibles la despasivación electroquímica más común y relevante. Esta forma de picado aparece como resultado de una acidificación localizada en la interfase metal-solución.

Morfología asociada: dependiendo de las características metalúrgicas de la aleación y de la química del medio, las picaduras pueden ser elípticas, esféricas, profundas, superficiales, subyacentes o pueden seguir algún plano cristalino preferencial. En la Fotografía 4 se muestra como ejemplo una de las morfologías del ataque.



Fotografía 4. Picado.

2.6.3. Corrosión Microbiológica (MIC)

El MIC es un proceso de ataque de naturaleza electroquímica al igual que la corrosión inorgánica. No obstante, la participación de microorganismos es activa e induce características diferenciales en el proceso sin modificar su naturaleza. En el MIC la acción de los microorganismos tiene lugar en la interfase metal-medio, a partir de la formación de una biopelícula, quedando el proceso electroquímico supeditado a la interrelación entre el proceso de corrosión y la biopelícula formada. La participación de los microorganismos en los procesos corrosivos se puede evaluar según el efecto que producen sobre el medio: a) formación de ácidos, b) depolarización catódica, c) aireación diferencial, y d) formación de consorcios bacterianos.

Dentro de los distintos tipos de microorganismos que podemos encontrar asociados a procesos corrosivos en la industria del petróleo y del gas, las BRS (bacterias reductoras de sulfato) son en general las de mayor frecuencia y criticidad. La incidencia de estas bacterias en el ataque corrosivo se infiere a partir de la presencia de FeS (sulfuro de hierro) presente en la celda de corrosión.

Los suelos arcillosos, saturados o con alto contenido de agua (mayor al 20% en masa), de pH neutro, con resistividades menores a 2000 $\Omega\cdot\text{cm}$ y potenciales rédox inferiores a 400 mV, que alternan entre las condiciones aeróbicas y anaeróbicas, son los más propicios para el desarrollo de las BSR.

Morfología asociada: existen distintos tipos de morfologías de ataque microbiológico posibles. Se pueden observar orificios (“pits”), al igual que en el caso de corrosión por picado, pueden presentarse cavidades más extendidas, surcos cóncavos aislados o agrupados en distintas direcciones, socavado de tipo irregular, etcétera. En este tipo de ataque es fundamental la caracterización de las especies presentes en la zona de los defectos. En la Fotografía 5 se muestra la morfología del ataque.



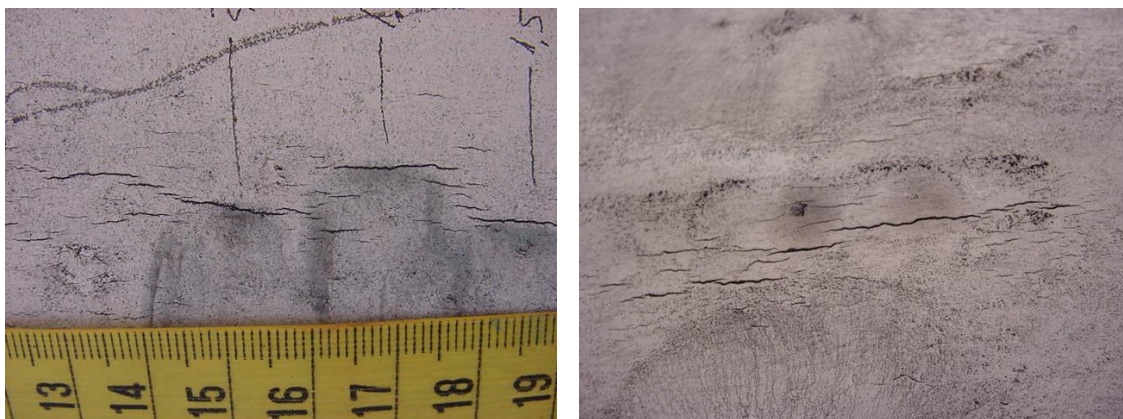
Fotografía 5. Corrosión microbiológica.

2.6.4. Corrosión Bajo Tensiones (CBT o “SCC”, en inglés, “Stress Corrosion Cracking”)

Este tipo de ataque corrosivo se origina por la combinación simultánea de tres factores: una aleación susceptible, un medio corrosivo específico y cierto nivel de esfuerzo de tracción. Mediante este fenómeno, materiales dúctiles sometidos a tracción y expuestos a ciertos medios corrosivos, se comportan como materiales frágiles, presentando fisuras a tensiones muy inferiores a las de ruptura. Las mitades de piezas falladas ajustan perfectamente, indicando que la fisuración es primariamente mecánica, con muy poca disolución electroquímica durante el proceso de fractura. Sin embargo la disolución anódica juega un papel muy importante. El potencial electroquímico tiene gran influencia en la corrosión bajo tensión. La presencia de un film es un prerequisite para la corrosión bajo tensión.

Morfología asociada: está caracterizado por la presencia de numerosos defectos planos cuya relación profundidad – longitud es pequeña y cuya propagación es inestable. La corrosión bajo tensión (SCC de alto pH) presenta fisuras intergranulares, esto es, fisuras que siguen los límites de grano, mientras que macroscópicamente siguen un camino perpendicular a la tensión de tracción.

En el caso de caños revestidos con recubrimientos en base asfáltica o cintas, se observa la presencia de fisuras localizadas preferentemente en zonas en donde el revestimiento se encuentra despegado, o en donde se presentan fallas localizadas. En la Fotografía 6 se muestra la morfología del ataque.

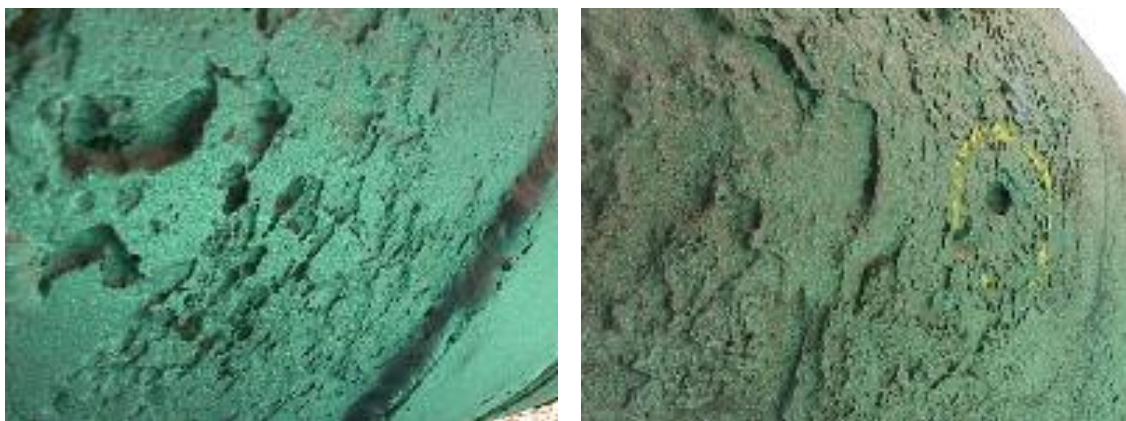


Fotografía 6. Corrosión bajo tensiones (SCC).

2.6.5. Corrosión por Aireación Diferencial

En teoría, el mecanismo de aireación diferencial funciona siempre y cuando exista una diferencia apreciable en la concentración de oxígeno de ánodo y cátodo. Sin embargo, esto no siempre sucede en la práctica, fundamentalmente debido a la influencia del pH. Si el pH es igual en ambas partes de la celda (con y sin oxígeno), en el caso de aceros al carbono se verifica lo siguiente: a) $\text{pH} < 8$: la diferencia de oxígeno provoca un leve aumento del potencial de ambas zonas con el consecuente aumento en la velocidad de corrosión, b) $8 < \text{pH} < 10$: la celda diferencial opera normalmente. Aunque el potencial de la zona aireada crece, su velocidad de corrosión disminuye debido a la pasivación de la superficie. El potencial y la velocidad de corrosión de la zona desoxigenada crecen. La corriente que fluye entre ánodo y cátodo es elevada, c) $10 < \text{pH} < 13$: el potencial de ambas zonas crece pero la corriente que circula entre ambas es muy pequeña (la macrocelda no opera). Indudablemente, la existencia de una macrocelda (Fotografía 5) debido a la aireación diferencial está condicionada a que la zona catódica esté pasiva. Esta circunstancia dependerá de la salinidad del medio y del pH.

Morfología asociada: está caracterizado por la presencia de zonas con ataque agrupado irregular, con picaduras (“pits”) por lo general agrupados, y zonas circundantes sin ataque o de muy baja intensidad. En la Fotografía 7 se muestra la morfología del ataque.



Fotografía 7. Aireación diferencial.

2.7. Investigación en campo

A título de ejemplo se presenta un estudio realizado en campo con el objeto de estudiar los mecanismos de daño externo presentes en un ducto e identificar el origen del ataque presente.

2.7.1. Características químicas y físicas del suelo

En la Fotografía 8 se presenta una vista parcial de la zanja y de la cañería luego de retirar el revestimiento. A partir de muestras tomadas en diferentes sectores se efectuaron análisis físico químicos y bacteriológicos con el objeto de caracterizar la agresividad del medio. Se tomaron muestras de diferentes puntos, a saber: a)

suelo a diferentes profundidades (100 y 150 cm), b) muestras de agua de napa freática y c) muestras de agua de un arroyo cercano. En las Tablas 6 a 9 se muestran los resultados obtenidos.



Fotografía 8. Vista de la zanja y de la cañería antes de la preparación superficial.

Tabla 6: Valores medidos en la napa freática y en un arroyo cercano.

PARAMETROS	UNIDADES	ARROYO	Freática
pH	u de pH	8,4	7,7
Conductividad	mS/cm	6,4	27,6

Tabla 7: Valores medidos *in situ* en la zanja.

PARAMETROS	UNIDADES	1m	2 m
Suelo	tipo	arcilloso	arcilloso
Tapada	m	1,5	1,5
pH	u de pH	7,9	8,2
Conductividad (en extracto de saturación)	mS/cm	84,0	81,1
Humedad	%	21,0	39,4
Humedad	N/A	Saturado	Sat/Sum
Drenaje	N/A	Pobre	Pobre
Potencial Redox	mV	150	90

Tabla 8: Análisis químico de las muestras de suelo extraídas en el laboratorio.

PARAMETROS	UNIDADES	1m	2 m
Sulfatos (en extracto de saturación)	mg/L	10800	9900
Cloruros (en extracto de saturación)	mg/L	21150	20250
Bacterias sulfato reductoras	UFC/g	-	100

Tabla 9: Análisis químico de las muestras de agua extraídas en el laboratorio.

PARAMETROS	UNIDADES	ARROYO	Freática
Carbonatos	mg/L CaCO ₃	74,4	< 1
Sodio	mg/L	960	4100
Magnesio	mg/L	73,6	225,8
Potasio	mg/L	45,5	228,0
Calcio	mg/L	52,1	99,7
Cloruros	mg/L	1197,9	5897,5
Sulfatos	mg/L	659,0	2655,5
Bacterias sulfato reductoras	UFC/ml	1000	1000

2.7.2. Evaluación del revestimiento

- **Tipo del revestimiento:** revestimiento de base asfáltica.
- **Estado del revestimiento (condición general y local, roto, arrugado, ampollado):** presentaba signos de degradación y pérdida de propiedades, con presencia de carbonatos.
- **Adherencia:** el revestimiento evidenciaba características típicas de la degradación del material por envejecimiento, de comportamiento frágil y quebradizo. En las zonas de mayor cantidad de defectos el revestimiento estaba roto.



Fotografía 9. Vista de la interfase ducto/revestimiento.

2.7.3. Análisis de los productos de corrosión y/o depósitos

Con el objeto de avanzar en la caracterización del tipo de ataque presente sobre la superficie del caño se procedió a la determinación de las especies químicas presentes en la interfase metal revestimiento. Para ello se utilizó la solución de ácido clorhídrico, aplicado directamente la solución sobre los defectos con ayuda de una jeringa. Los productos de corrosión y/o depósitos identificados cualitativamente se detallan en la tabla 10.

Tabla 10: Análisis de los productos de corrosión y/o depósitos.

COMPUESTO	REACCIÓN
Sulfuro de hierro	Opaco/negro brillante. Olor a huevo podrido al agregar ácido muriático. Blanco/gris claro.
Carbonato de calcio	Reacción amarilla efervescente al agregar ácido muriático.

2.7.4. Parámetros asociados a la cañería

- **Temperatura del caño:** la temperatura medida sobre la superficie de la cañería fue de 45°C.
- **Potencial:** dado que cerca de la zona de estudio se encontraba instalada una estación de medición electroquímica (EPA) se midieron los parámetros asociados.
 - Potencial: si bien se observa un decremento general tanto en potencial OFF como en los niveles de polarización en el tiempo, en la zona de análisis la polarización sigue siendo suficiente como para asegurar niveles mínimos superiores a 0.3 V, y potenciales OFF en el orden de 0.8 V (Cu/CuSO₄).
 - Velocidad de corrosión instantánea promedio (5 mediciones): 70 ± 15 micrones/año.

2.7.5. Morfología de ataque corrosivo

En la fotografía 10 se muestra la morfología de los defectos presentes en la zona bajo estudio. Se aprecia una zona de socavado alrededor de orificios de mayor profundidad, eventualmente atribuible a la presencia de un tubérculo, propio de un proceso de ataque de origen microbiano. Luego de la caracterización de los productos de corrosión se procedió al agregado de alcohol, saliendo del interior de los orificios presentes un

compuesto de coloración negra. Adicionalmente, se verifica que la superficie restante de la cañería estaría libre de corrosión, lo cual es típico de este mecanismo de daño localizado.



Fotografía 9. Morfología de los defectos bajo estudio.

2.7.6. Mecanismos de corrosión: origen del ataque

En función de todo la información disponible, se establece como mecanismo de ataque corrosivo más probable el asociado a un proceso de origen microbiano (MIC), ya sea por efecto directo (proceso electroquímico activado por bacterias) o indirecto (celda de concentración diferencial propiciada por biofilm bacteriano).