



**ESCUELA SUPERIOR DE CIENCIAS EXPERIMENTALES Y  
TECNOLOGÍA**

**GRADO EN INGENIERÍA DE MATERIALES**

**Curso académico 2023/24**

**Trabajo Fin de Grado**

**TÍTULO DEL PROYECTO**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO A CORROSIÓN DE  
TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE EN  
VIVIENDAS**

**Autor: RICARDO SÁNCHEZ GONZÁLEZ**

**Tutores: MARÍA DOLORES LÓPEZ GONZÁLEZ**

**Dpto. de los profesores: MATEMÁTICA APLICADA, CIENCIA E  
INGENIERÍA DE LOS MATERIALES Y TECNOLOGÍA  
ELECTRÓNICA**

**OCTUBRE 2024**

# ÍNDICE

## Contenido

<b>1. Resumen</b> .....	4
<b>2. Objetivos</b> .....	4
<b>3. Introducción</b> .....	4
<b>1.1. Historia</b> .....	5
<b>1.2. Actualidad</b> .....	6
<b>1.3. Sistemas de abastecimiento de agua</b> .....	6
<b>4. Análisis del estado del arte y vigilancia tecnológica</b> .....	10
<b>4.1. Generalidades. Protección y evaluación del riesgo a corrosión en sistemas de distribución de almacenamiento y distribución de agua.</b> .....	10
<b>4.2. Tuberías de cobre y aleaciones de cobre</b> .....	14
<b>4.2.1. Factores que influyen en la corrosión del cobre y sus aleaciones</b> .....	15
<b>4.3. Tuberías de fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación</b> .....	21
<b>4.3.1. Tuberías de fundición dúctil</b> .....	22
<b>4.3.2. Tuberías de acero</b> .....	23
<b>4.3.3. Factores que influyen en la corrosión de fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación</b> .....	24
<b>4.4. Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable</b> .....	28
<b>4.5. Tuberías de materiales féreos galvanizados</b> .....	33
<b>4.5.1. Factores que influyen en la corrosión de materiales féreos galvanizados en caliente</b> .....	34
<b>4.6. Tuberías de acero inoxidable</b> .....	38
<b>4.6.1 Factores que influyen en la corrosión del acero inoxidable</b> .....	39
<b>4.7. Tuberías de plomo</b> .....	41
<b>4.7.1. Factores que influyen en la corrosión del plomo</b> .....	41
<b>4.8. Tuberías de hormigón armado y cemento</b> .....	43
<b>4.8.1. Factores que influyen en la corrosión del hormigón armado</b> .....	44
<b>4.8.2. Factores que afectan a la lixiviación de compuestos del hormigón y mortero de cemento</b> .	49
<b>4.9. Tuberías poliméricas. Alternativa a los materiales metálicos por sus problemas de corrosión.</b> .	50
<b>4.9.1. Propiedades generales de las tuberías poliméricas y comparación con los materiales tradicionales</b> .....	50
<b>4.9.2. Factores que afectan a la degradación de tuberías poliméricas</b> .....	52
<b>5. Resultados y discusión del uso de los diferentes tipos de tuberías para agua doméstica.</b> .....	54
<b>6. Análisis de fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio</b> .....	57
<b>6.1. Antecedentes</b> .....	57

<b>6.2. Ensayos realizados.....</b>	<b>58</b>
<b>6.3. Análisis de resultados.....</b>	<b>60</b>
<b>6.4. Conclusiones del fallo y posibles soluciones.....</b>	<b>68</b>
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>69</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>71</b>

## 1. Resumen

El desarrollo de tuberías surgió de la necesidad de transportar y distribuir el agua de un lugar a otro. A lo largo de la historia se han utilizado distintos materiales dependiendo de los recursos que disponían en cada momento.

La arcilla inicialmente, y el cobre, bronce y plomo en la Edad de los Metales fueron los materiales más utilizados hasta la Revolución Industrial, donde debido a los elevados avances tecnológicos comenzaron a fabricarse tuberías de fundición de hierro, acero y hormigón. A partir de la Segunda Guerra Mundial y la escasez de materias primas, comenzaron a utilizarse los materiales poliméricos. Debido a sus buenas características y propiedades han pasado a ser los materiales más utilizados en la actualidad para distribución en sistemas de agua potable.

En este trabajo se ha realizado un estudio de los distintos materiales utilizados para la distribución del agua potable, donde nos focalizamos principalmente en el riesgo a corrosión que presentan, los factores de influencia y sus inconvenientes tanto en las infraestructuras como en la salud humana y medio ambiente, así como sus posibles soluciones y alternativas. Comentaremos el cobre, fundiciones de hierro, acero de bajo carbono, acero galvanizado, acero inoxidable, plomo, hormigón armado y mortero de cemento, así como la alternativa que presentan los materiales poliméricos, siendo los más utilizados hoy en día en sistemas de distribución de agua potable.

Por último, acabaremos con el estudio de un fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio, analizándolo en profundidad.

## 2. Objetivos

- Estudio bibliográfico del comportamiento a corrosión de los distintos materiales utilizados para sistemas de distribución de agua potable.
- Factores que afectan a la corrosión de sistemas de distribución de agua potable.
- Estudio y análisis de los productos de corrosión formados en el interior de las tuberías.
- Análisis de un caso práctico de fallo en servicio de una tubería galvanizada para red interior/doméstica.

## 3. Introducción

El **agua** es un elemento esencial para la vida y su suministro ha desempeñado un papel muy importante en la historia y evolución de las civilizaciones. El desarrollo de los sistemas de distribución surgió de la necesidad de transportar los fluidos de un lugar a otro para abastecer las necesidades básicas de la población, tanto su consumo como evacuación. Para ello, aprovecharon los recursos y conocimientos que tenían en su momento para transportarla.

Su **calidad** (expresada en características químicas, físicas y biológicas) varía de un lugar a otro, viéndose afectada por la fuentes de agua, el tratamiento al que se somete y el sistema donde se distribuye, influyendo en la salud de la población.

El tratamiento de potabilización a la que se ve sometida consiste en eliminar las sustancias que resultan tóxicas para el ser humano que puedan ocasionar un potencial riesgo para la salud. El agua se potabiliza en Estaciones de Tratamiento de Agua Potable, también llamadas plantas potabilizadoras, donde tras una serie de pasos se consigue agua apta para el consumo humano, tanto para beber como para cocinar.

El contacto con el **material de la tubería** puede causar **lixiviación** de componentes, **corrosión del material** o promover el crecimiento de **microorganismos** en la superficie interior. Los dos primeros casos producen contaminación química del agua, mientras que la aparición de microorganismos deteriora su estabilidad biológica. Este último término se define como la capacidad del agua de mantener las mismas características microbiológicas desde la planta de tratamiento hasta su punto de consumo. [1]

La corrosión del material en la parte interna de los sistemas de distribución y almacenamiento de agua generalmente conduce al desarrollo de una capa de producto de corrosión en la superficie que puede o no ser protectora dependiendo de las circunstancias. La etapa inicial de formación de estas capas es muy importante, ya que, si se forman bajo las condiciones adecuadas, las variaciones adversas posteriores de la calidad del agua y/o de las condiciones de servicio se ven muy reducidas.

La corrosión puede producir alteraciones en el sistema como obstrucciones, perforaciones o modificaciones en la composición del agua.

La presencia de microorganismos en el interior de las tuberías y su crecimiento depende de varios factores como la disponibilidad de nutrientes, la concentración de desinfectante, la temperatura y pH del agua o existencia de biopelícula o capa de corrosión interna. [2]

## 1.1. Historia

El consumo de agua potable y la evacuación de aguas negras, fue un punto de inflexión para la esperanza de vida del ser humano, evitando numerosas plagas y enfermedades que fácilmente se reproducían y transmitían en el agua. Su correcto suministro, evolucionando constantemente gracias al avance y descubrimiento de nuevos materiales y procesos de fabricación, mejoró el nivel de vida y ayudó enormemente al desarrollo de las civilizaciones a lo largo de los años.

A pesar de utilizarse tuberías de arcilla cruda en Mesopotamia, de cobre en Egipto y de plomo y bronce en Grecia, fueron los romanos los grandes revolucionarios de la plomería.

Sin embargo, a partir de la caída del Imperio Romano y el inicio de la Edad Media el progreso en el desarrollo de la plomería se estancó.

Las tuberías de fundición gris y hierro fundido predominaban durante la Revolución Industrial con la mejora de los procesos de fabricación de la industria durante el Siglo XVIII. Estas tuberías eran más duraderas y podían soportar grandes presiones, lo que las convertía en una buena opción a gran escala, a pesar de sufrir corrosión con el paso de los años. El plomo también tuvo una gran importancia gracias a su maleabilidad y facilidad de instalación.

La fundición de hierro predominó durante muchas décadas junto con el plomo. Fue a finales del Siglo XIX cuando el acero galvanizado comenzó a adquirir importancia debido a su elevada resistencia a la corrosión.

Iniciado el Siglo XX, el hierro fundido seguía utilizándose junto con la implementación de las tuberías galvanizadas, mientras que el plomo debido a su elevada toxicidad se fue reduciendo gradualmente.

El cobre ganó gran popularidad junto con el hormigón en los años 30 por su gran resistencia a la corrosión.

Sin embargo, la Segunda Guerra Mundial restringió el uso de hierro, acero y cobre y obligó a la industria de la plomería a comenzar a utilizar nuevos materiales como los polímeros.

Fue en la segunda mitad del Siglo XX cuando estos materiales empezaron a utilizarse a mayor escala en sistemas de distribución de agua. [3] [4]

## 1.2. Actualidad

A mediados del Siglo XX, las tuberías de cobre y acero galvanizado seguían siendo las más comunes hasta la llegada de los materiales poliméricos, cuya investigación y desarrollo fueron imprescindibles para producirse un gran cambio en la selección de materiales para la conducción de agua en las redes de distribución. El PVC y HDPE fueron los pioneros, que junto con el PEX constituyen los materiales más ampliamente utilizados en el sector actualmente.

Hoy en día se sigue investigando en gran medida mejoras en los materiales actuales con el fin de poder crear un material idóneo, con las características necesarias para la distribución de agua potable, así como sostenible y reciclable en el tiempo.

## 1.3. Sistemas de abastecimiento de agua

Un sistema de abastecimiento es el conjunto de obras o tecnologías (tuberías, instalaciones y accesorios) que permiten que llegue el agua desde las fuentes naturales (aguas subterráneas, superficiales o agua de lluvia) hasta el punto de consumo, con la cantidad y calidad requerida. **Las tuberías** son conductos formados por tubos de diversas longitudes y tamaños donde circula el agua de un lugar a otro. Estas se dividen en tuberías de transmisión, distribución y de servicio. [5]

Este sistema está destinado a **captar, conducir, tratar, almacenar y distribuir** las aguas desde su fuente hasta los hogares de los usuarios satisfaciendo las necesidades de la población. Estas fases reciben el

nombre de **grupos funcionales** en un sistema de abastecimiento de agua, que describiremos más adelante.

Para que se puedan producir las anteriores fases son necesarias las **redes de tuberías, instalaciones y diversos accesorios** como juntas o bombas para que llegue el agua al consumidor. [6]

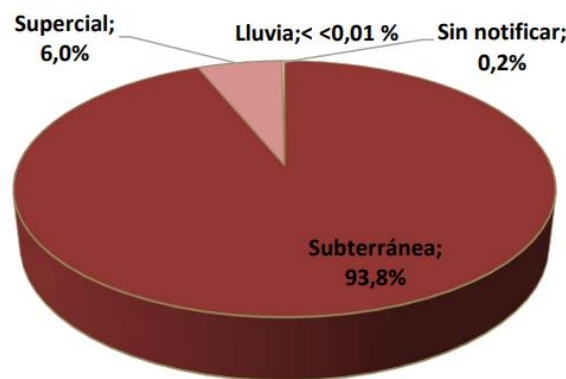
Para entender mejor el contexto e importancia de este trabajo, hablaremos en primera instancia de las **zonas de abastecimiento**, sus **infraestructuras** y el **control de calidad del agua** de consumo.

La **zona de abastecimiento** es un área geográficamente definida y censada por la autoridad sanitaria en la que el agua de consumo provenga de una o varias captaciones y cuya calidad sea homogénea en la mayor parte del año incluyendo todo el conjunto de instalaciones: toma de captación, conducción, tratamiento de potabilización, almacenamiento, transporte y distribución del agua de consumo hasta las acometidas o punto de entrega a los usuarios.

Los porcentajes posteriormente referidos para definir y comprender mejor estos términos están basados en el 85,5% de la población española censada en el año 2022.

El **agua de captación** es el agua de las masas de agua que va a ser destinada para la producción de agua de consumo independientemente de su origen y del tratamiento requerido. Estas masas de agua pueden ser superficiales (lago, laguna, embalse, corriente, río o canal, parte de una corriente, aguas de transición o aguas costeras) o subterráneas en un acuífero o acuíferos (pozo excavado, pozo entibado, manantial, galería de filtración). En el apartado 4.4. **Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable** analizamos la importante influencia del origen del agua en el comportamiento a corrosión y sus productos generados en tuberías de hierro como material base.

En el año 2022 en España el 82,3% de las captaciones procedían de agua subterránea (93,8% del volumen total captado), el 14% de agua superficial (6% de volumen total captado) y el 0,1% de agua de lluvia. (ver *Gráfica 1.*) [6]



*Gráfica 1. Volumen de agua captada por origen del agua en España en el año 2022. (%) [6]*

El agua potable debe ser incolora, inodora e insípida y cumplir con la reglamentación de cada país.

El proceso de potabilización del agua sigue los siguientes pasos: pretratamiento, coagulación-floculación, decantación, filtración, desinfección y análisis [7]. Los procesos unitarios de tratamiento más frecuentes han sido la desinfección (61,7%), (siendo el hipoclorito de sodio el más utilizado (44,4%)), seguido de la filtración (8,5%) y la coagulación-floculación (5,1%). [6]

Al igual que el origen del agua, el tratamiento que recibe para potabilizarla también es determinante para el riesgo a corrosión que sufren las tuberías metálicas como estudiaremos posteriormente. La calidad del agua (principalmente los parámetros fisicoquímicos) debe ser monitoreada cuidadosamente y controlada regularmente durante la operación de la tubería, así como el mantenimiento adecuado de la instalación y el tratamiento apropiado del agua, ya que un alto contenido en cloro y sus derivados puede propiciar la aparición de picaduras fatales para el sistema.

Las **redes de distribución** son el conjunto de tuberías diseñadas para la distribución del agua de consumo desde la ETAP o desde los depósitos de cabecera, distribución o regulación, hasta la acometida del usuario. [8]

En las zonas de abastecimiento, previa a las redes de distribución encontramos las redes de transmisión. A continuación, describiremos los distintos tipos de redes en un **sistema de distribución de agua**, sus funciones y los materiales más utilizados.

**1. Red de transmisión:** Estas redes están formadas por tuberías de gran diámetro por donde fluye el agua bien desde la fuente de agua donde es captada hasta la planta de tratamiento (agua cruda), o bien desde la planta de tratamiento hasta el área donde se encuentra el sistema de distribución o los tanques de almacenamiento, en el caso de que se encuentren a una gran distancia. Estas tuberías recorren largas distancias transportando grandes volúmenes de agua excediendo en algunos casos los 3 metros de diámetro (ver *Ilustración 1*). [6]



*Ilustración 1. Cuatro tuberías de hierro fundido de 36 pulgadas. [8]*

Están diseñadas para soportar grandes presiones y manejar grandes caudales de agua. Por este motivo, los materiales comúnmente utilizados son **acero, fundición dúctil u hormigón pretensado**. En algunos casos también se está utilizando **el polietileno de alta densidad**.



**2. Red de Distribución:** Conjunto de tuberías diseñadas para la distribución del agua de consumo desde la ETAP o desde los depósitos de cabecera, distribución o regulación hasta la acometida del usuario, bien sea hasta viviendas, comercios, o edificios públicos. Debido a las distintas zonas por las que suelen distribuirse, se suelen dividir en tres: primaria, secundaria y terciaria.

Las tuberías de distribución primarias actúan como las arterias principales. Poseen un diámetro grande y están fabricadas de materiales resistentes como **el acero, fundición dúctil u hormigón pretensado**.

Las tuberías de distribución secundarias conectan las primarias con zonas más específicas dentro de la zona de abastecimiento, como barrios o urbanizaciones. Poseen un menor diámetro y suelen fabricarse **de fundición dúctil, PVC o polietileno de alta densidad**.

Por último, las tuberías de distribución terciarias constituyen las ramificaciones finales. Sus diámetros son pequeños y transportan el agua directamente a los usuarios finales, estando comúnmente formadas por materiales flexibles y ligeros como **PVC o polietileno de alta densidad**.

En el año 2022 en España, el **material más frecuente** de las redes de distribución era el **polietileno de alta densidad (63,1%), seguido del fibrocemento (33%) y de PVC (30,3%)**. A pesar de su peligrosidad y su sustitución obligada por ley, todavía quedan en España 84 km de tuberías de plomo, suponiendo el 0,46% de las redes de distribución. [6]

**3. Laterales de Servicio:** Representan el punto final del sistema de distribución de la zona de abastecimiento. Están formadas por tuberías que conectan las tuberías de distribución terciarias con los usuarios finales, estableciendo la conexión directa desde la red pública a cada usuario final. Estas redes terminan en la válvula de acometida o en el medidor de agua en el límite del edificio o establecimiento. Sus diámetros son pequeños y suelen estar formados por **PVC, polietileno de alta densidad, fundición dúctil, cobre y acero galvanizado**.

**4. Instalación o red interior:** Localizada a continuación de la válvula de acometida de agua, estas redes interiores distribuyen el agua desde el punto de entrada hasta los diferentes puntos de consumo dentro de las viviendas. Los materiales utilizados actualmente son los poliméricos, destacando el **PEX, CPVC, PE, PVC y cobre**. El acero inoxidable se utiliza solo para aplicaciones muy específicas, mientras que el acero galvanizado ha sido desplazado debido a sus problemas de corrosión a largo plazo. En el apartado [6. Análisis de fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio](#), se estudiará en profundidad su comportamiento frente a la corrosión y el daño ocasionado en una instalación tras 30 años de servicio.

Las zonas de abastecimiento y sus principales infraestructuras anteriormente mencionadas disponen de instalaciones y accesorios imprescindibles para un correcto funcionamiento del sistema, como las

**estaciones de bombeo** utilizadas para bombear el agua de las zonas más bajas a las más elevadas, manteniendo además la presión y caudal adecuados de toda la instalación; o las **estaciones reductoras de presión** utilizadas para controlar la presión que circula por el sistema. En cuanto a los accesorios que mantienen unido el sistema monitorizando los flujos, destacan las **válvulas** encargadas por ejemplo de detener el flujo de agua cuando hay una rotura o avería, las articulaciones angulares permitiendo que la tubería cambie de dirección siendo comunes los ángulos de 90°, 45° y 22 ½° y los **medidores** que rastrean la cantidad de agua que entra o sale del sistema de distribución. [8]

El correcto funcionamiento y **selección de material** de estos accesorios influye enormemente en el comportamiento a corrosión de los sistemas. Por ejemplo, grandes diferencias de presiones en el sistema pueden provocar corrosión fatiga o corrosión bajo tensión, mientras que una mala selección de los materiales utilizados para válvulas o uniones pueden provocar corrosión galvánica, corrosión en resquicio y picaduras.

## 4. Análisis del estado del arte y vigilancia tecnológica

El análisis y vigilancia de este trabajo se verá estructurado de forma similar a la norma **UNE-EN 12502: ``Protección de materiales metálicos contra la corrosión. Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua``** y complementado con datos e imágenes de artículos bibliográficos, donde se explicarán los distintos factores que influyen en el comportamiento a corrosión del **cobre y sus aleaciones, fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación, materiales férreos galvanizados en caliente y aceros inoxidable**s. [9]

### 4.1. Generalidades. Protección y evaluación del riesgo a corrosión en sistemas de distribución de almacenamiento y distribución de agua.

La corrosión en la parte interna de los sistemas de distribución y almacenamiento de agua generalmente conduce al **desarrollo de una capa de producto de corrosión en la superficie que puede o no ser protectora** dependiendo de las circunstancias. La etapa inicial de formación de estas capas es muy importante, ya que, si se forman bajo las condiciones adecuadas, las variaciones adversas posteriores de la calidad del agua y/o de las condiciones de servicio se ven muy reducidas.

La **corrosión puede producir alteraciones en el funcionamiento del sistema**, es decir, generar daños por **corrosión**.

Estas **alteraciones** pueden manifestarse por sí mismas mediante:

- Perforaciones originando fugas
- Obstrucciones de componentes del sistema
- Modificaciones de la composición del agua potencialmente perjudiciales

Los distintos **tipos de corrosión** que ocasionan las alteraciones mencionadas que pueden producirse en los sistemas de distribución y almacenamiento de agua son:

Corrosión uniforme producida de manera homogénea en toda la superficie y corrosión localizada concentrada preferentemente sobre lugares específicos de la superficie, en ambos casos expuestos al medio corrosivo.

En esta última destacan la corrosión por picaduras, cavernosa o en resquicio, selectiva, intergranular, bimetalica o galvánica, por erosión, por fatiga y bajo tensión. Las definiciones y características aparecen en la norma ISO 8044:2020.

Factores que afectan al **tipo y velocidad** de corrosión:

A su vez, el tipo y velocidad de corrosión para las instalaciones pueden depender de los siguientes **factores**:

*Tabla 1. Factores de influencia en el riesgo de corrosión. [9]*

<b>Características del material metálico</b>	<b>Características del agua</b>	<b>Diseño y construcción</b>	<b>Ensayo a presión y puesta en marcha</b>	<b>Condiciones de servicio</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Composición química / microestructura</li> <li>– Estado superficial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Composición fisico-química (véase la tabla 2)</li> <li>– Partículas sólidas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Geometría</li> <li>– Sistemas polimetálicos</li> <li>– Juntas</li> <li>– Tensiones de tracción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Limpieza por extracción total</li> <li>– Drenaje</li> <li>– Desinfección / enjuague</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temperatura / Variaciones de temperatura</li> <li>– Condiciones de flujo</li> <li>– Desinfección</li> </ul>

## **1. Las características del material metálico**

1.1. Composición química/microestructura. El riesgo depende del tipo de aleación. Para algunos metales, un pequeño cambio en la composición de la aleación altera notablemente el riesgo, mientras que para otros es insignificante.

1.2. Estado superficial. La rugosidad, las deposiciones o incrustaciones de las tuberías y componentes influyen en el riesgo, especialmente en la formación inicial de **pilas de celdas de corrosión**.

## **2. Las características del agua**

### 2.1. Composición fisicoquímica.

La siguiente tabla muestra algunos de los principales parámetros físicos y químicos del agua que pueden influir en la corrosión en un sistema de distribución y almacenamiento de agua:

Tabla 2. Parámetros físicos y químicos el agua. [9]

Características	Unidad
Temperatura	°C
pH	
Conductividad a 20 °C	µS/cm
Dureza total (concentración de componentes de Ca + Mg solubles)	mmol/l
Dureza cálcica (concentración de componentes de Ca solubles)	mmol/l
Alcalinidad (por valoración hasta un pH de 4,2)	mmol/l
Acidez (por valoración hasta un pH de 8,2)	mmol/l
Oxígeno disuelto	mmol/l
Iones cloruro	mmol/l
Iones nitrato	mmol/l
Iones sulfato	mmol/l
Compuestos de fósforo	mmol/l
Compuesto de silicio	mmol/l
Carbono orgánico total	mg/l

La composición química del agua potable y su intervalo de variación con el tiempo influye significativamente en el riesgo de corrosión del sistema. Estudiaremos como los cambios en su composición, variaciones de temperatura, nivel de pH, oxígeno disuelto o la concentración y la relación de la concentración de los distintos aniones en ella es crucial para su corrosividad.

Los fosfatos y silicatos, además de otras especies inorgánicas y orgánicas que se pueden encontrar de forma natural en el agua, pueden **inhibir** las reacciones de corrosión mediante su incidencia en la formación de capas protectoras. En muchos casos son añadidas en las concentraciones requeridas para disminuir el riesgo a corrosión.

### 3. El diseño y la construcción

#### 3.1. Geometría.

Determina en gran medida las **características del flujo** de agua que circula por el sistema.

La presencia de grietas puede crear un riesgo de **corrosión en resquicio** mientras que la de zonas muertas crea condiciones de estancamiento con depósitos, aumentando el riesgo de **corrosión por picaduras**, pudiendo incrementarse por la actividad microbiana.

La **corrosión por erosión** puede producirse en zonas con velocidades de circulación localmente altas, como en los codos pronunciados o en reducciones o aumentos de diámetro pronunciados.

#### 3.2. Sistemas polimetálicos.

El contacto eléctrico directo entre metales diferentes da lugar a la posibilidad de la corrosión bimetalica o **galvánica**, donde se incrementa la velocidad de corrosión del metal menos noble.

El riesgo de este tipo de corrosión aumenta principalmente con el aumento de la diferencia de potencial de corrosión de los metales en contacto, el aumento de la conductividad del agua y el descenso de la relación entre la superficie catódica y anódica.

La corrosión galvánica puede ocurrir **incluso sin contacto directo** entre los dos metales diferentes, cuando los iones disueltos del metal más noble se electro-depositan en el metal menos noble resultando en un incremento de la actividad catódica de forma localizada.

### 3.3. Juntas y uniones.

El tipo de uniones puede tener una gran influencia en la formación de grietas, combinación de distintos metales y cambios en la microestructura y superficies afectadas térmicamente debido al soldeo.

### 3.4. Tensiones de tracción.

Pueden producir **corrosión bajo tensión** por la fabricación e instalación del sistema. A veces pueden aparecer en latones y ciertos aceros inoxidable.

Además, puede aparecer **corrosión fatiga** debido a los esfuerzos por variaciones en la temperatura del agua en algunas partes de la instalación, particularmente donde la estructura está fijada de forma rígida al edificio.

## **4. El ensayo de presión y la puesta en servicio**

Cuando se realiza el ensayo de presión de un sistema utilizando agua, es importante que permanezcan completamente llenos con agua después del ensayo. De lo contrario, pueden quedar áreas parcialmente llenas con entornos **de 3 fases entre metal, agua y aire**, pudiendo causar corrosión importante en el nivel de la línea de agua. El ensayo de presión con aire seco es una mejor opción para evaluar la resistencia del sistema.

Además, limpieza por extracción total, desinfección y enjuague, eliminando cualquier tipo de materia extraña como arena, **restos** de fundente de soldadura, polvo y depósitos que puedan producir la aparición de **pilas de corrosión localizadas** en condiciones de estancamiento.

## **5. Las condiciones de funcionamiento**

### 5.1. Temperatura.

Su influencia es diferente en distintos tipos de corrosión, metales y composición del agua.

Si un sistema de agua sufre grandes variaciones de temperatura, es posible que los productos de corrosión puedan **descascarillarse** debido a los **diferentes coeficientes de dilatación** pudiendo obstruir los componentes localizados al final de la canalización.

## 5.2. Condiciones de flujo.

El régimen y la velocidad (número de Reynolds) del flujo de agua son aspectos críticos de riesgo de corrosión. Entre los dos casos opuestos de circulación de agua (caudal completo y estancamiento de agua), se encuentra un amplio intervalo de condiciones de circulación de agua en el mismo sistema.

Los caudales localmente elevados pueden causar **corrosión por erosión** por la eliminación de las películas protectoras superficiales, dependiendo de la geometría.

Por el contrario, largos periodos de estancamiento facilitan la **estabilización de las pilas locales de corrosión** y la aparición del ataque por picaduras. Además, los caudales muy bajos facilitan la aparición de depósitos dificultando a su vez la eliminación de los ya existentes, creando así el riesgo de **corrosión por picaduras** bajo los depósitos.

Debido a la complejidad de las interacciones de los distintos factores que influyen, la extensión de la corrosión solo puede expresarse en términos de probabilidad.

Por lo tanto, la **prevención** con el fin de minimizar el riesgo de daños por corrosión mediante el diseño, instalación y operación de los sistemas, así como la implantación de métodos de protección frente a la corrosión o la ayuda en el análisis de fallos, son muy importantes a la hora de seleccionar los materiales que constituyen los sistemas de distribución de agua de consumo humano de los materiales metálicos.

## 4.2. Tuberías de cobre y aleaciones de cobre

Las tuberías de cobre para conducción de agua potable han sido utilizadas durante cientos de años por distintas civilizaciones. En los años treinta del Siglo XX, comenzaron a utilizarse de forma masiva en Europa y Estados Unidos.

Entre sus características destacan su notable resistencia a la corrosión, de la que hablaremos a continuación en mayor profundidad, por lo que un sistema de distribución de agua potable de cobre puede durar varias décadas sin incidencias cuando las condiciones son óptimas.

El cobre es además dúctil y maleable, lo que lo convierte en un material fácil de trabajar y formar parte de diseños complejos. Debido a su elevado precio, el cobre se utiliza principalmente en sistemas laterales de servicio, por lo que su selección para transportar grandes volúmenes de agua en redes de transmisión y distribución no tendría sentido (ver *Ilustración 2*) [10]

Sus propiedades antimicrobianas lo convierten en un sistema seguro para transportar agua, lo que lo convierte en el día de hoy en el **material metálico no férreo** más utilizado para sistemas de distribución de agua potable especialmente en las redes laterales de servicio.

#### 4.2.1. Factores que influyen en la corrosión del cobre y sus aleaciones

Las instalaciones de agua potable en cobre y aleaciones son en general resistentes al daño por corrosión. Sin embargo, hay ciertas condiciones donde son susceptibles.



Ilustración 2. Tubería de cobre en red interior.

El cobre y sus aleaciones forman incrustaciones de corrosión, formaciones minerales que se acumulan en el interior de la tubería, afectando a las condiciones de flujo

y calidad del agua. Además de las producidas por la corrosión, también puede producirse por compuestos presentes en el agua que transportan y cristalizar directamente sobre la superficie interior de la tubería, como en el caso de carbonatos de calcio y de magnesio.

Como mencionamos en el [apartado 4.1](#), el riesgo de corrosión del cobre y sus aleaciones en sistemas de distribución de agua para consumo humano en edificios depende de la **formación de una capa de producto de corrosión** que **puede ser o no protectora** y que comienza a formarse tan pronto como el metal entra en contacto con el agua. [\[11\]](#)

Esta capa será más protectora cuanto más impida los intercambios iónicos y electrónicos entre el metal y el agua, aumentando la durabilidad del metal.

La concentración real de cobre está influenciada por la **composición del agua, el tiempo y las condiciones operativas**. La disolución de los productos de corrosión incrementa la concentración de iones en el agua, siendo solo solubles en pequeñas cantidades, estableciendo la OMS un límite de 2 mg/L, recogido en el BOE [\[12\]](#)

##### a) Corrosión uniforme

El daño producido por este tipo de corrosión es raro y se ve muy influenciado por las propiedades de las capas superficiales protectoras que se forman. En la mayoría de los casos, debido a la cantidad de bicarbonato presente en el agua, se forma además de una capa de  $\text{Cu}_2\text{O}$  roja y  $\text{CuO}$  negra, otra de hidroxicarbonato de cobre  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  de color verde sobre estas. Esto se produce durante el periodo de funcionamiento inicial, y progresivamente genera la formación de un depósito.

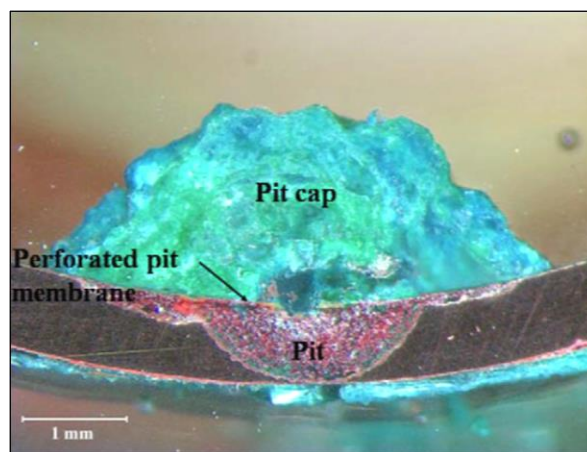
Si las condiciones son correctas, puede formarse una capa uniforme de  **$\text{CuO}$  negra protectora**. (Ver [Ilustración 6b](#)). La formación de las capas protectoras se verá favorecida por la **renovación regular del agua**, especialmente en la etapa inicial, siendo importante **evitar zonas de estancamiento** mediante un correcto diseño del sistema.

Respecto a las **características del agua**, la velocidad de corrosión uniforme depende principalmente del valor del pH del agua, siendo **despreciable por encima de 7,5** y más agresiva según vaya disminuyendo, por lo que es importante mantenerla neutra, ya que cuanto más ácida sea, aumentará la corrosión y la solubilidad de los compuestos de cobre en el agua.

Como posibles soluciones, la velocidad de corrosión uniforme puede decrecer por la adición de **inhibidores**, por ejemplo, ortofosfatos, o por alcalinización del agua mediante la adición de NaOH y/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , por la adición de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o por el uso de filtros, por ejemplo, de mármol, piedra caliza o dolomita.

## b) Corrosión por picaduras

Las picaduras en tuberías de agua potable es un fenómeno que no está muy comprendido entre los especialistas y genera debate en cuanto a qué sistema condiciones, mecanismos, morfología y mineralogía presentan, ya puede variar de un a otro. [13][14] (ver *ilustración 3*). Sin embargo, la mayoría de los estudios coinciden en que pueden manifestarse bajo circunstancias críticas de **temperatura, composición del agua y condiciones de operación**.



*Ilustración 3. Aspecto estructural de una picadura en tubería de cobre. El color verde azulado corresponde a malaquita  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  [14]*

Esta corrosión puede formarse inicialmente tras el primer llenado del sistema, dependiendo de la estabilidad de las pilas de corrosión y de la formación de capas protectoras. El flujo turbulento reduce el riesgo de corrosión mientras que el **estancamiento o un caudal bajo lo aumenta** sobre todo en presencia de depósitos, por lo que un correcto diseño del sistema es crítico para evitar este tipo de corrosión. Como medidas preventivas, la instalación de un filtro de agua, la unión de tubos mediante racores o la adicción de inhibidores al agua evita en gran medida la corrosión por picaduras.

Hay dos tipos de corrosión por picadura en el cobre. Tipo I en agua fría y Tipo II en agua caliente.

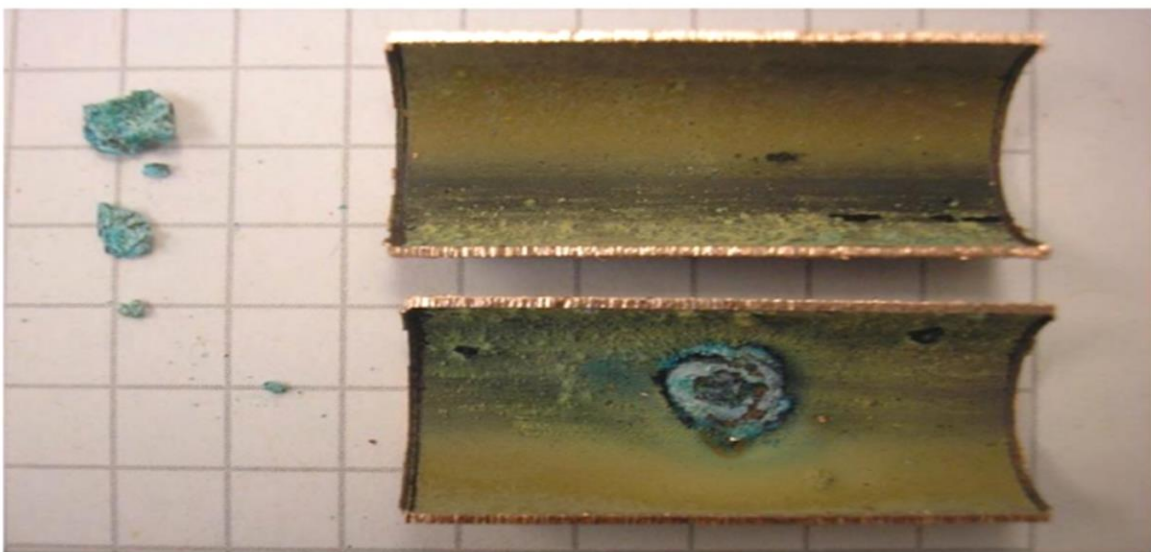
### Tipo I: Corrosión por picaduras en agua fría.

Picaduras hemisféricas con formación de nódulos de color verde azulado consistentes en hidroxicarbonato de cobre  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  sobre el área atacada. Bajo estos nódulos, la picadura está casi siempre cubierta por una capa de  $\text{Cu}_2\text{O}$  continua al nivel de la primera superficie. (ver *Ilustración 4 e ilustración 6 c) y d).*)



La velocidad de corrosión el agua fría es alta y puede producirse la perforación completa de la pared en pocos años. Un cambio de la composición del agua puede inducir este tipo de corrosión en tuberías relativamente viejas debido a la reactivación de las pilas previamente pasivadas.

La composición del agua y la naturaleza y concentración de aniones influyen en el riesgo de corrosión. El aumento de la concentración de iones sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) incrementa el riesgo. Un estudio indicó que la adición de estos iones para el ablandamiento del agua actuaba como catalizadores favoreciendo la corrosión por picaduras en tuberías de cobre de agua potable, siendo la influencia del  $\text{Cl}^-$  más alta que la del  $\text{SO}_4^{2-}$  [13]. Este tipo de corrosión no se produce a temperaturas que permanecen por encima de  $30^\circ\text{C}$ .



*Ilustración 4. Picadura en el interior de una tubería de agua fría. La picadura se encontraba bajo el tubérculo azulado de la zona superior izquierda de la imagen. [13]*

**Tipo II: Corrosión por picaduras en agua caliente.** Como se muestra en la *Ilustración 5*, se forman picaduras con una abertura estrecha y una geometría interna irregular, con  $\text{Cu}_2\text{O}$  en su interior. La composición y la temperatura del agua son los factores que influyen en agua caliente, estando restringida a aguas ácidas con niveles bajos de bicarbonato ( $< 1,5 \text{ mmol/l}$ ) y altos en sulfatos [12] [15].

Como posibles soluciones, aumentando el nivel de pH se reduce en gran medida el riesgo de corrosión en agua caliente, siendo tanto la velocidad de corrosión como la frecuencia, menor que en agua fría.

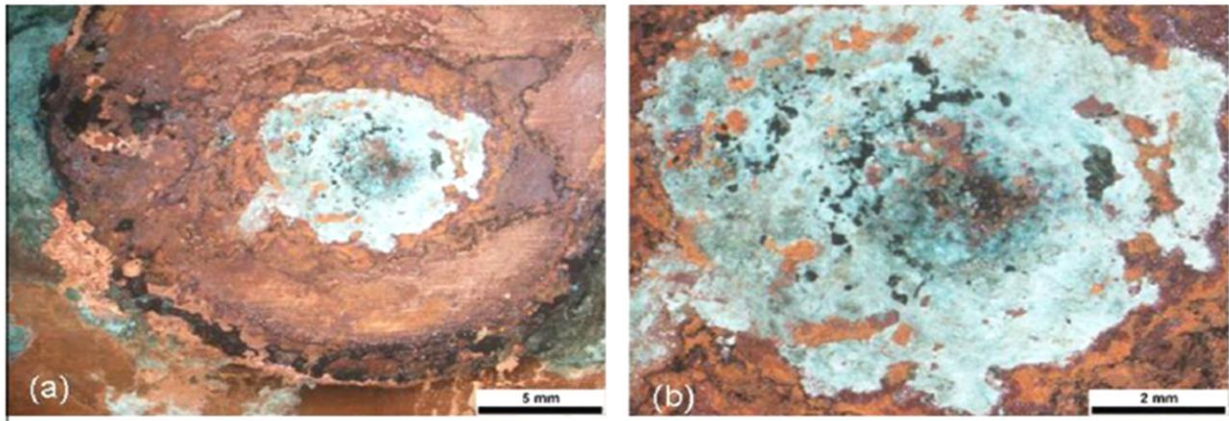


Ilustración 5. Picaduras de cobre producidas en agua caliente con bajo nivel de pH y alta presencia de cloruros.[15]

La *ilustración 6* muestra la comparación externa e interna de tuberías de cobre de agua caliente y agua fría de misma composición química en una comunidad de Ohio [15].

En la *Ilustración 6 a)* podemos observar que la superficie exterior de la tubería no presenta ninguna fuga debido a que zona interior de la tubería de agua caliente estaba cubierta con una cascarilla de  $\text{CuO}$  de color negro uniforme que, junto con el pH básico del agua que transportaba, protegió a la tubería y evitó la formación de picaduras. (*ver Ilustración 6 b)*).

En la *Ilustración 6 c)* y *d)* las tuberías de agua fría mostraron picaduras aleatorias en su superficie (similares a la *Ilustración 4)*, atravesando la pared y provocando fugas en las zonas donde aparece el producto de corrosión azulado.

En la *Ilustración 7* se muestran otras tuberías de cobre de una comunidad vecina que transportaban la misma calidad del agua habiendo añadido compuestos de fosfato en su composición, observando claramente la ausencia de corrosión y verificando la eficacia de los inhibidores.

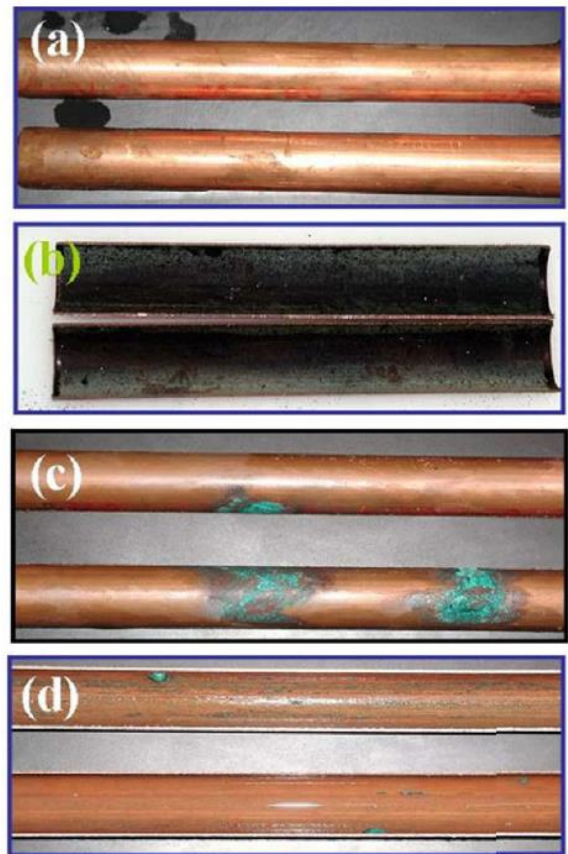


Ilustración 6. Comparación de la corrosión de tuberías de cobre en agua caliente. a) Exterior de tubería b) Interior de tubería con  $\text{CuO}$ . Y en agua fría c) Exterior de tubería con cascarilla de  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  d) Interior de tubería. [14]

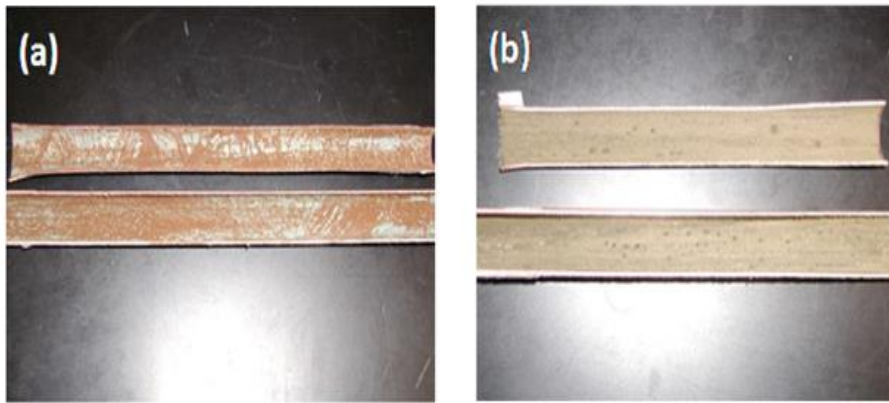


Ilustración 7. Interior de tuberías de cobre con misma agua que Ilustración 6 pero con inhibidores de fosfato. a) En agua fría b) En agua caliente. [14]

Además de los anteriores dos tipos de corrosión dependientes de la temperatura del agua, existen picaduras con **influencia microbiana**, de forma hemisférica caracterizadas por áreas de ataque bien definidas con productos de corrosión voluminosos formados por capas de  $\text{Cu}_2\text{O}$  y hidroxisulfato de cobre  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{SO}_4$  sobre esta, cubiertas alrededor por una capa negra de  $\text{CuO}$ . [11]

A pesar de encontrarse bacterias y microbios en el interior de picaduras de cobre, no está claro si su presencia se debe a que utilizan la oxidación del cobre como producto de energía o como fuente de energía primaria, incluso si el ácido de sus excrementos es capaz de disolver el cobre. (ver Ilustración 8).

Los autores de la investigación realizada en Santa Fe [17], proponen la hipótesis de que las bacterias se afianzaron al tubo debido a la presencia de películas orgánicas residuales como compuestos desengrasantes o lubricantes de extrusión. La presencia de compuestos orgánicos proporciona fuente de carbono para su establecimiento y posterior asentamiento. Formadas las picaduras se produce la formación de una membrana de  $\text{Cu}_2\text{O}$  y un montículo de  $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  exterior a ella.

La velocidad de corrosión es rápida como en agua fría produciéndose sobre todo en aguas con bajo contenido de bicarbonato y baja conductividad. El riesgo de este tipo de corrosión es bajo si la temperatura del agua es mayor de  $55^\circ\text{C}$ .

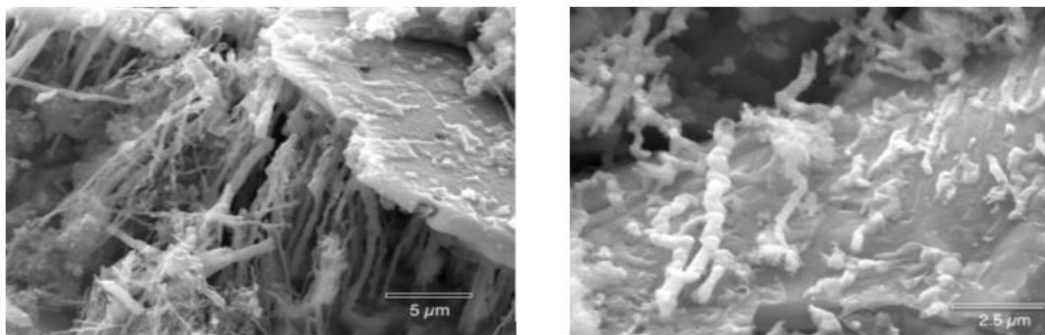
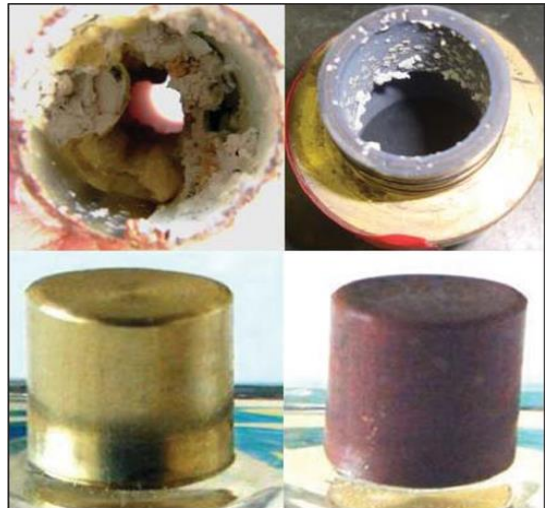


Ilustración 8. Filamentos de microbios de color blanco dentro de picadura. [17]

### c) Corrosión selectiva

El tipo de corrosión más común en aleaciones de cobre es la descincificación del latón, produciendo un descenso de la resistencia mecánica. Este proceso produce la eliminación del cinc dejando cobre poroso y productos de corrosión blancos en el interior, mientras que el exterior adquiere un color rojizo debido a su enriquecimiento en cobre. (ver *Ilustración 9.*) Un contenido superior a un 85% de cobre incrementa la resistencia a la descincificación en los latones.



*Ilustración 9. Descincificación del latón pasando de color dorado a color rojizo debido a su enriquecimiento en cobre. [18]*

La descincificación se observa en sistemas con aguas con baja concentración de bicarbonato y alta de iones cloruro, incrementándose a elevadas temperaturas y en condiciones de estancamiento con la formación de depósitos.

Para evitar este problema, las aleaciones de bronce industrial o de cañón, formadas por cobre-estaño-cinc-plomo son prácticamente inmunes a la descincificación debido a su alto contenido en cobre.

### d) Corrosión bimetálica o galvánica

Aunque el cobre al ser un material noble no suele estar en peligro, con ciertas combinaciones puede causar daño en los materiales, como veremos que ocurre en el acero galvanizado, especialmente cuando la relación de superficies cátodo/ánodo y la relación entre la concentración de aniones activadores ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^-$ ) e inhibidores ( $\text{HCO}_3^-$ ) son altas, incrementando la velocidad de corrosión.

### e) Corrosión erosión

Produce una corrosión no uniforme ocasionando picaduras en forma de herradura o islas de metal no corroído cuando se supera un grado crítico de turbulencia, especialmente en codos, válvulas y accesorios de las tuberías donde se perturba el caudal de agua, presentando el material afectado un aspecto pulido brillante. Por lo tanto, un mal diseño o instalación pueden producir un incremento local de la turbulencia especialmente en secciones transversales reducidas y cambios bruscos de la dirección de circulación.

La velocidad de agua fría en las canalizaciones de cobre debe estar por debajo de la crítica de 3 m/s para el servicio intermitente y 2 m/s para largos periodos en funcionamiento. En el caso del agua caliente la velocidad crítica de circulación es aproximadamente de 0,5 m/s. [11]

El riesgo se incrementa con el descenso del pH del agua, la presencia de partículas sólidas, burbujas de gas y con el aumento de la temperatura.

#### **f) Corrosión bajo tensión**

El cobre y sus aleaciones tienen una susceptibilidad diferente. El cobre y el bronce industrial son resistentes, mientras que los latones tienen una alta susceptibilidad.

Los esfuerzos en tracción internos producidos en la puesta en marcha del sistema incrementan el riesgo, que puede reducirse por recocido del componente acabado. Este tipo de corrosión solo puede producirse en aguas con un contenido significativo de nitritos y/o amoníaco, que debido a su baja concentración en agua potable no suelen producir daños.

Esfuerzos críticos en la construcción o montaje del sistema como roscas sobre apretadas de latón incrementan el riesgo a largo plazo.

#### **g) Corrosión fatiga**

Puede llegar a producirse en sistemas de agua caliente debido a la dilatación y contracción térmica ocasionadas por la variación de la temperatura del agua, produciendo esfuerzos cíclicos bajo la influencia de la corrosión, manifestándose en forma de grietas.

### **4.3. Tuberías de fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación**

La corrosión del hierro y sus aleaciones ha sido un grave problema en muchos aspectos a lo largo de la historia, donde su popularidad y uso generalizado comenzó con la Revolución Industrial durante el Siglo XIX.

En el caso de los sistemas de distribución de agua potable, los problemas más relevantes han estado relacionados con la corrosión, ocasionando en muchos casos la pérdida de integridad funcional de los sistemas debido al deterioro estructural, fugas y pérdidas de presión afectando al suministro de agua potable.

Los productos de corrosión formados por óxidos de hierro y en ocasiones metales pesados se transmiten al agua en contacto poniendo en riesgo la salud de la población y el medio ambiente debido principalmente a la toxicidad de estos últimos.



*Ilustración 10. Tuberías de acero al carbono.*

Las tuberías de materiales férricos utilizadas para los sistemas de distribución de agua potable son de **fundición gris, fundición dúctil, acero de bajo carbono y baja aleación, acero galvanizado y acero inoxidable**. La selección entre el hierro y el acero depende de muchos factores entre los que destacan las presiones de trabajo y resistencia requeridas, la durabilidad de la instalación y el presupuesto del proyecto. Para comprender mejor este apartado, compararemos las diferencias microestructurales y de composición que presentan las tuberías de fundición y de acero, previo a su estudio de corrosión.

#### 4.3.1. Tuberías de fundición dúctil

Las tuberías de hierro fundido se utilizan sobre todo en sistemas de transmisión y distribución debido a sus propiedades mecánicas, destacando su alta resistencia y durabilidad, siendo idóneas para manejar grandes caudales de agua y altas presiones. (ver *Ilustración 11*). [19]

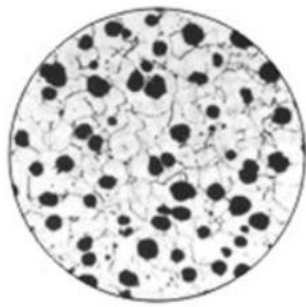


*Ilustración 11. Tuberías de fundición dúctil.*

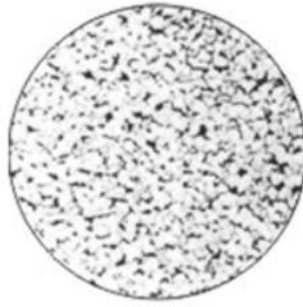
El hierro dúctil se convirtió en una alternativa más atractiva a partir de mediados del Siglo XX en comparación con el hierro fundido tradicional (fundición gris) debido a sus mejores propiedades mecánicas y su mayor resistencia a la corrosión producida por la adición de magnesio como elemento de aleación.

Como su propio nombre indica, el hierro dúctil es menos frágil y mucho más maleable que el hierro fundido tradicional, con elevado límite elástico pudiendo deformarse significativamente antes de fracturarse, a la vez de ser muy tenaz siendo capaz de absorber mucha energía antes de romperse, haciéndole resistente a impactos y vibraciones.

Esta aleación está formada principalmente de hierro, carbono (entre 1,7 y 5%) y silicio (entre 1 y 3%), convirtiéndola en una aleación ternaria. Además, puede contener pequeñas proporciones de otros elementos como manganeso, magnesio y cobre. Con la adición de magnesio, el grafito del hierro dúctil cristaliza de una forma esferoidal que le confiere sus propiedades mejoradas respecto a la fundición gris donde el grafito aparece en forma de láminas que facilitan la propagación de grietas (ver *Ilustración 12*). [19]



Ductile Iron Pipes



Steel Pipes



Grey Iron Pipes

*Ilustración 12. Microestructuras de hierro fundido dúctil, acero para tuberías (bajo carbono y/o baja aleación) y hierro fundido gris utilizados en tuberías. El color negro representa el grafito y el claro la matriz (ferrita, austenita, perlita) [19]*

A pesar de que se mejoró mucho la resistencia a la corrosión con la implantación del hierro dúctil, en la mayoría de los casos se utiliza un recubrimiento interior y exterior para protegerlo contra la corrosión e incrementar su durabilidad a la vez de evitar posibles catástrofes estructurales, debido a que la mayor parte de su composición está compuesta de hierro, muy propenso a la oxidación.

Los materiales más utilizados como **revestimiento interno** son el mortero de cemento y la pintura epoxi, siendo el cinc o aleación aluminio-cinc, el polietileno, el poliuretano y de nuevo la pintura epoxi, los más utilizados en **revestimientos externos**. Los revestimientos internos además de proteger contra la corrosión mejoran notablemente el flujo hidráulico debido a su menor rugosidad. [19]

Estos revestimientos incrementan el precio total de la tubería y la instalación, pero a su vez está justificado debido al notable incremento de la vida útil del sistema, así como ser obligatorio en la mayoría de las normativas locales.

#### 4.3.2. Tuberías de acero

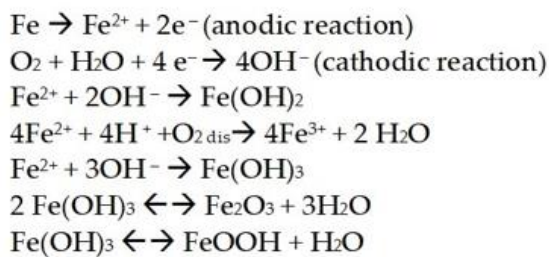
Las tuberías de acero presentan mejores propiedades mecánicas que las de fundición, por lo que son utilizadas en situaciones y escenarios más críticos o donde se tiene mayor presupuesto. Sus propiedades permiten manejar altas presiones, transportar grandes volúmenes de agua y aumentar la vida útil del sistema.

Al igual que en las tuberías de fundición, debido a su alto contenido en hierro, es necesario aplicar un recubrimiento para protegerlas contra la corrosión. En los apartados [4.5 Tuberías de materiales férreos galvanizados](#) y [4.6 Tuberías de acero inoxidable](#) estudiaremos en profundidad los factores que afectan a la corrosión de las tuberías de acero protegidas por recubrimientos de cinc y de cromo respectivamente.

### 4.3.3. Factores que influyen en la corrosión de fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación

La corrosión del hierro metálico significa su disolución de la tubería metálica como  $\text{Fe}^{2+}$  simultáneamente con la reducción de los agentes oxidantes presentes en el agua:  $\text{O}_2$  disuelto,  $\text{H}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ , y los introducidos en forma de desinfectantes: oxidantes primarios como el cloro libre, las cloraminas y el dióxido de cloro. Este proceso se produce de forma natural a través de un proceso electroquímico en el que el sustrato de hierro actúa como ánodo o donador de electrones, mientras que la superficie de la tubería actúa como cátodo o aceptador de electrones.

Además, el Fe (II) puede oxidarse a Fe (III), creando corrosión por agrietamiento y picaduras. A continuación, observamos las reacciones químicas que ocurren en el proceso de corrosión del hierro:



Los principales parámetros que afectan a la estabilidad de la tubería están relacionados con las características del agua que fluye por las mismas: alcalinidad, pH y presencia de iones cloruro y sulfato.

El riesgo de corrosión de los materiales féreos no aleados y de baja aleación (aceros y fundiciones) en contacto con agua depende de la formación de capas de productos de corrosión que pueden ser o no protectoras. [20]

Cuando están presentes capas que no son protectoras, pueden aparecer tuberculaciones en las paredes de los componentes y pueden llevar a efectos de corrosión como: lodos en agua, coloración (agua roja o negra), reducción de la sección transversal de las tuberías o incluso perforación de la pared.

#### a) Corrosión uniforme

La corrosión uniforme del acero y la fundición está asociada con la transferencia de iones hierro (II)  $\text{Fe}^{2+}$  al agua (pérdida de metal). Estos iones disueltos en el agua pueden reaccionar con el oxígeno para formar compuestos de hidróxido de hierro (II) - (III) menos solubles, que conducen a la formación de turbidez y de lodos, que normalmente no conducen a daños por corrosión.

La condición para que se puedan formar capas protectoras en el interior de la tubería es una composición del agua con  $c(\text{O}_2) > 3 \text{ mg/l}$ ,  $\text{pH} > 7$ ,  $c(\text{HCO}_3^-) > 2 \text{ mmol/l}$  y  $c(\text{Ca}^{2+}) > 1 \text{ mmol/l}$ , además del tipo y concentración de componentes naturales presentes en el agua como fosfatos o aluminosilicatos. [20]



Con aguas con cantidad suficiente de carbonato cálcico  $\text{CaCO}_3$  pueden formarse capas protectoras de esta sal y de óxidos de hierro hidratados si la intensidad de corrosión es lo suficientemente baja en condiciones de circulación. Por el contrario, bajo condiciones de estancamiento se manifiesta siempre corrosión localizada.

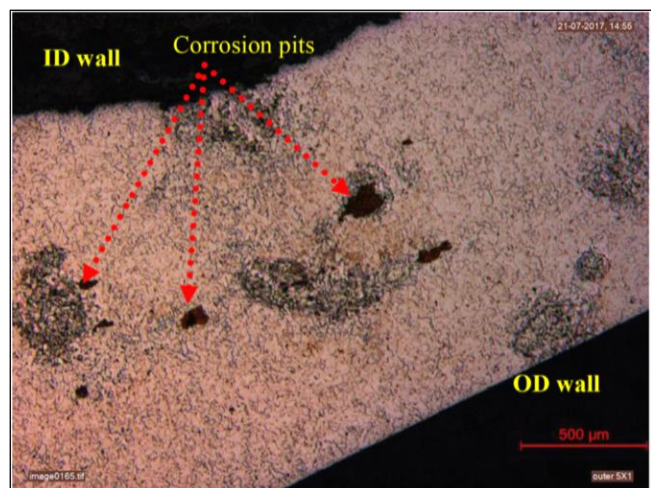
En ausencia de capas protectoras, el grado de corrosión se determina por la concentración de agentes de oxidación y/o agentes acidificantes, como el  $\text{CO}_2$ . La velocidad de corrosión uniforme es muy baja si  $c(\text{O}_2) < 0,1 \text{ mg/L}$  y  $\text{pH} > 8,5$ .

Respecto a las condiciones operativas en ausencia de recubrimientos de óxido protectores, **la velocidad de corrosión uniforme se incrementa** con el aumento de caudal y/o de la temperatura. Sin embargo, en condiciones de estancamiento la velocidad de corrosión uniforme es insignificante debido a que la concentración de oxígeno  $c(\text{O}_2)$  cae rápidamente a niveles por debajo de  $1 \text{ mg/L}$  como consecuencia de la corrosión, además de incrementarse el pH por encima de 8. [20]

## b) Corrosión por picaduras

Este tipo de corrosión es el **más frecuente en los aceros y fundiciones** de instalaciones de distribución y almacenamiento de agua, manifestándose como picaduras poco profundas o con bordes escarpados. Las velocidades de corrosión son generalmente altas y pueden perforar rápidamente las paredes de la instalación.

Se desarrollan a partir de **pilas galvánicas** dependiendo de las condiciones superficiales de los materiales, de los parámetros del agua y de las condiciones de servicio. Las **superficies anódicas** siempre se forman en las regiones metálicas con difícil entrada de oxígeno por factores geométricos, como por ejemplo en cavidades, mientras que **las superficies catódicas** son las metálicas no recubiertas con libre acceso de oxígeno. En la *ilustración 13* podemos ver picaduras de corrosión formadas en una tubería tras 20 años de servicio. [21]



*Ilustración 13. Picaduras de corrosión formadas en matriz ferrítica en tubería de agua tras 20 años en servicio. [21]*

La **manifestación exterior** es la formación de tubérculos bajo los que se encuentran las superficies anódicas, permaneciendo las catódicas en las capas superficiales.

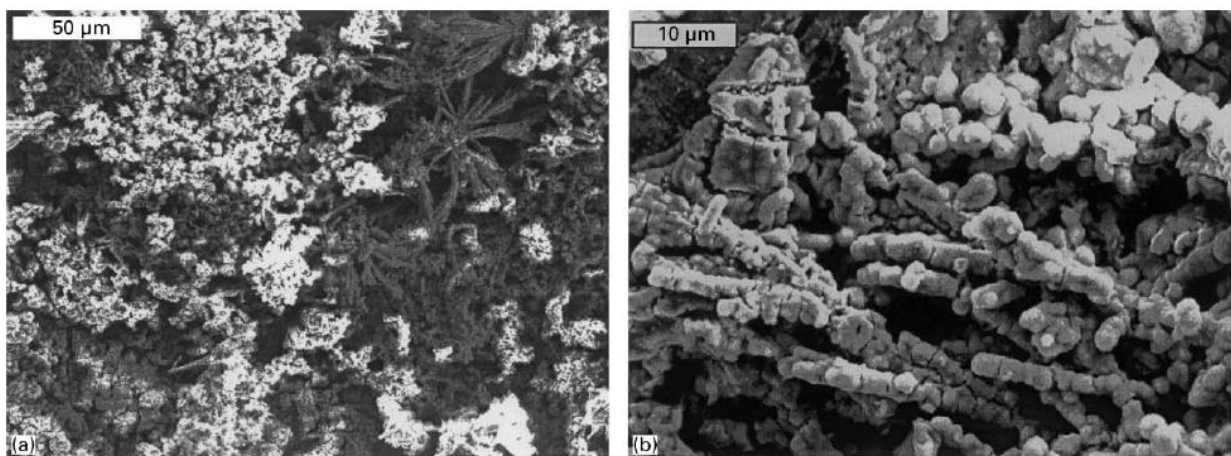
La calidad de la superficie del material metálico influye en la formación de las pilas galvánicas donde las superficies anódicas se ven favorecidas por los depósitos de todo tipo, como partículas de óxido, residuos

de aceite y pintura o productos de corrosión, así como heterogeneidades. Además, un correcto diseño y construcción de la instalación debe evitar las condiciones de estancamiento, huecos no visibles, uniones solapa ya que inducen a zonas anódicas de pilas de corrosión.

En cuanto a las características del agua, el riesgo disminuye con el incremento de la concentración de iones bicarbonato que neutralizan la acidez causada por la hidrólisis de los iones de hierro de la picadura. Por el contrario, el riesgo incrementa con el aumento de iones cloruro, sulfato y nitrato debido a que reemplazan a los iones bicarbonato y no son capaces de tamponar la acidez formada en la picadura.

Además, este tipo de corrosión puede incrementarse por **la actividad microbiana** que tiene lugar en condiciones anaeróbicas, especialmente bajo los depósitos. La introducción de materias orgánicas tales como el aceite, la grasa, o aguas de origen superficial proporcionan una fuente de nutrientes para los microorganismos favoreciendo así la aparición de corrosión microbiana. (ver *Ilustración 14.*)

Existe un mayor riesgo de corrosión en los sistemas que se vacían y rellenan periódicamente en comparación con los que permanecen llenos permanentemente, ya que en los primeros se produce el asentamiento de los depósitos y desarrollo de colonias de microorganismos especialmente en las zonas horizontales. Las temperaturas de entre 25 y 50 °C favorecen el crecimiento microbiano, siendo a partir de los 60 °C cuando comienza a reducirse el riesgo.

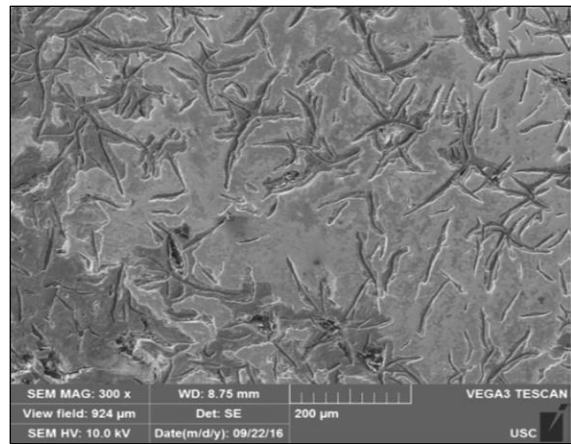


*Ilustración 14. Corrosión microbiana en un acero AISI 1020 tras estar en contacto con una solución de agua con  $1\text{ g l}^{-1}$  de NaCl. [22]*

### c) Corrosión selectiva

Normalmente el acero de baja aleación y la fundición no sufren corrosión selectiva, excepto en algunos casos donde se produce **grafitización** en tuberías viejas de fundición gris y **corrosión en resquicio** de forma específica en algunas soldaduras de tubos de acero al carbono. A pesar de esto la integridad de la instalación se verá raramente afectada a largo plazo.

La **corrosión gráfica** está asociada con la presencia de láminas de grafito en la fundición gris. Este es catódico respecto al hierro por lo que la matriz ferrita se corroe disolviéndose el hierro, dejando una masa porosa consistente en grafito, oquedades y óxido. (ver *Ilustración 15*) Esta forma de corrosión se produce preferiblemente en los puntos anódicos cuando la velocidad de corrosión es baja, y se incrementa con el aumento de los contenidos de ácido en el agua como el dióxido de carbono y en condiciones de estancamiento.



*Ilustración 15. Corrosión gráfica del metal base presentando un color más oscuro, alrededor de las hojuelas de grafito en fundición gris. [23]*

Si el metal se corroe más rápidamente, la superficie completa se elimina incluido el grafito, produciendo una corrosión más o menos uniforme. La cantidad de residuos de grafito retenidos en una superficie corroída depende de su morfología y de la corrosividad del medio.

En tuberías soldadas por resistencia eléctrica se puede producir corrosión en hendiduras en áreas restringidas del cordón relacionada con la corrosión preferente de ciertas fases que contienen azufre en el metal de aporte de la soldadura. Por este motivo se suele utilizar acero con muy bajo contenido en azufre además de un tratamiento térmico de estabilización.

#### **d) Corrosión bimetalica o galvánica**

Este tipo de corrosión es similar al encontrado en los materiales galvanizados, como resultado de la instalación mixta que involucra a componentes féreos con materiales que tienen un potencial de corrosión libre más positivo, como el cobre y sus aleaciones o el acero inoxidable. En estos casos los componentes féreos se polarizan anódicamente incrementándose el riesgo de corrosión por picaduras.

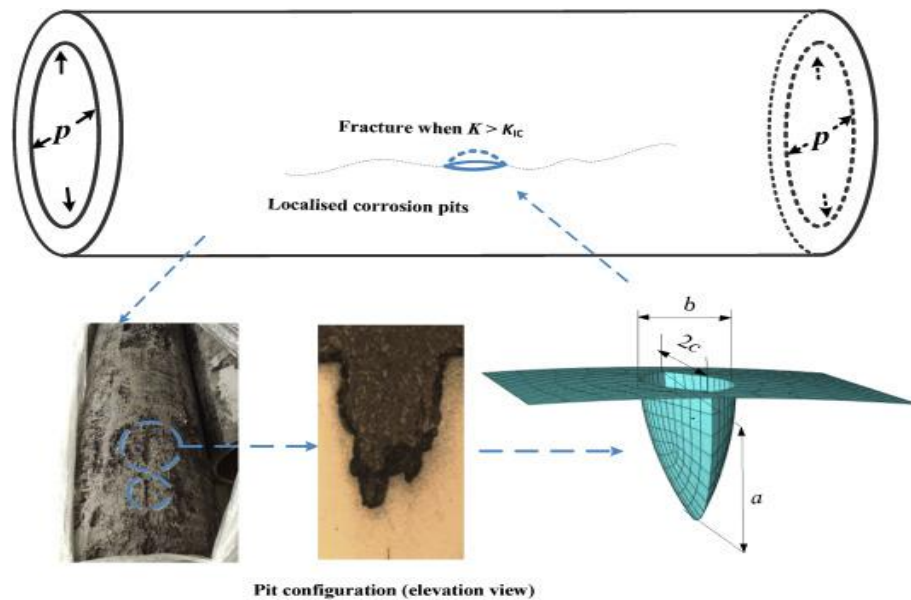
#### **e) Corrosión erosión**

A pesar de que el daño por corrosión erosión en materiales féreos es raro, puede ocurrir si se supera el grado crítico de turbulencia. Esto causa una corrosión no uniforme que a veces se muestra mediante hendiduras con forma de herradura en la misma dirección del flujo cuando este se perturba, por lo que un correcto diseño que disminuya la posibilidad de flujo turbulento y la velocidad de circulación es crítico para reducir este tipo de corrosión. Cuando es activa, la superficie en el interior de la hendidura puede aparecer intensamente pulida.

Aguas con presencia de burbujas de gas o partículas sólidas incrementan este tipo de corrosión.

#### **f) Corrosión bajo tensión**

Este tipo de corrosión es producida con la combinación de tensiones en la tubería en presencia de agentes corrosivos. En la *ilustración 16* podemos observar el mecanismo de inicio de una picadura de corrosión en la superficie externa de la tubería iniciada por corrosión bajo tensión. El riesgo aumenta con presencia de elementos corrosivos como cloruros ácidos o soluciones alcalinas. Las variaciones de temperatura del agua, las vibraciones del suelo o los golpes de ariete aumentan el riesgo.



*Ilustración 16. Mecanismo de corrosión bajo tensión en una tubería sometida a tensiones y presencia de agentes corrosivos. [24]*

#### 4.4. Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable

Con el paso del tiempo, los productos sólidos de corrosión se acumulan en el interior de la tubería creando **incrustaciones** gruesas responsables de la obstrucción, fugas y formación de agua roja con sus correspondientes consecuencias. [25]

Por un lado, la formación de **incrustaciones de corrosión estables puede inhibir** un mayor desarrollo del proceso de corrosión y reducir el riesgo de contaminación del agua transportada.

Por otro lado, los iones ferrosos y férricos liberados durante el proceso de corrosión y a partir de incrustaciones inestables, conocidos como liberación de hierro, pueden causar **el deterioro** de la calidad del agua.

Este proceso puede manifestarse de diferentes maneras, incluida la degradación de las tuberías, la liberación de subproductos de hierro, la restricción del flujo de agua, el crecimiento microbiano y la reducción de la seguridad del agua potable para los consumidores presentando una amenaza significativa.

Estas incrustaciones de corrosión están formadas por capas cuyas características morfológicas y fisicoquímicas varían según la fuente de agua sea superficial o subterránea. [26]

En el caso de que fluya agua de **origen superficial** aparecen escamas de corrosión gruesas o tubérculos duros densamente distribuidos teniendo una relación magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) /goethita  $\alpha\text{-FeOOH}$  (M/G) > (1,0). Según varios análisis y estudios, las tuberías que **agua superficial** están más corroídas y en un estado de corrosión relativamente más activo implicado por contenidos más altos de siderita  $\text{FeCO}_3$ , óxido verde y hierro total en las incrustaciones de corrosión.

Por el contrario, si la fuente de agua es **subterránea** las escamas de corrosión son delgadas y los tubérculos huecos donde la relación M/G era mucho más baja ya que en muchas ocasiones la cantidad de magnetita es mínima.

En este caso de aguas **subterráneas**, las tuberías aparecían menos corroídas debido a un mayor contenido de componentes férricos inestables como  $\gamma\text{-FeOOH}$ ,  $\beta\text{-FeOOH}$  y óxido de hierro amorfo  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en las incrustaciones.

En la *Ilustración 17* se puede observar esquemáticamente la estructura y composición de las incrustaciones según la fuente de agua que fluye por los sistemas de distribución.

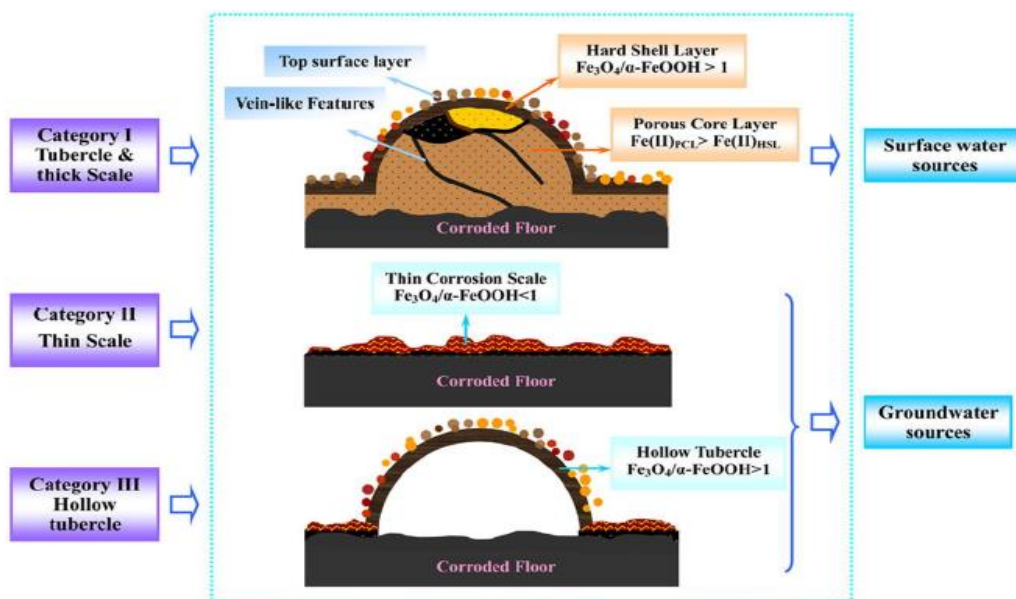


Ilustración 17. Estructura y composición de las incrustaciones según la fuente de agua que fluye por los sistemas de distribución. En la parte superior de la imagen podemos observar un tubérculo sólido producido por agua superficial. Por el contrario, en la imagen inferior observamos un tubérculo hueco formado por aguas subterráneas. [26]

Como hemos comentado, una vez iniciada la corrosión en las tuberías, los productos de corrosión se acumularán y formarán incrustaciones, depósitos de material que se acumula en las superficies internas de las tuberías debido a la exposición de sustancias externas. Los principales componentes de estas

incrustaciones en la superficie de las tuberías de hierro son óxidos e hidróxidos de hierro, como el **hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ )**, la **goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )**, la **lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ )** y la **maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ )**.

La *Ilustración 18* representa las diferentes etapas de formación de incrustaciones de corrosión: [25]

**a) Etapa inicial** de formación de incrustaciones de hierro, en la que el oxígeno disuelto oxida el hierro de la superficie de la tubería en iones ferrosos inicialmente, y posteriormente en férricos; mientras que los iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ) también pueden oxidar el hierro .

**b) Etapa intermedia.** A medida que avanza la formación de la incrustación se forma una capa similar a una cáscara que se adhiere firmemente a la superficie de la tubería y encapsula los materiales porosos de óxido de hierro. Esta capa está compuesta principalmente de **goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ )** y **magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )** y es relativamente compacta, bloqueando la difusión de oxidantes al sustrato metálico y, por lo tanto, inhibiendo el proceso de corrosión para que no avance.

**c) Etapa estable,** donde se observan las cuatro típicas capas de una incrustación de corrosión en tubería de hierro:

Capa 1: La primera capa inferior adherida a la superficie de la tubería, formando la base de la incrustación.

Capa 2: **Núcleo poroso** que cubre la superficie metálica compuesta de compuestos de hierro como goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), lepidocrocita ( $\gamma\text{-FeOOH}$ ), hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ), hidróxido férrico ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) y óxido verde (un hidróxido doble en capas que contiene  $\text{Fe}(\text{II})$  y  $\text{Fe}(\text{III})$ ) formado en condiciones anódicas .

Capa 3: Similar a una **cáscara**, es una capa compacta de unos pocos milímetros de espesor que cubre el núcleo poroso. Mantiene la estabilidad estructural de las incrustaciones por lo que es considerada como el esqueleto de estas. Además de óxidos e hidróxidos de hierro, la siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) también forma parte de esta capa desempeñando un papel importante.

Capa 4: Capa de sedimentos sueltos y heterogéneos típicamente compuesta por hidróxido férrico, goethita, lepidocrocita, silicatos, fosfatos y carbonatos.

A pesar de que se ha establecido una composición estándar de las incrustaciones, realmente depende de varios **factores** como la **calidad del agua transportada**, el **material de la tubería o revestimiento** y/o el **tiempo en servicio**.

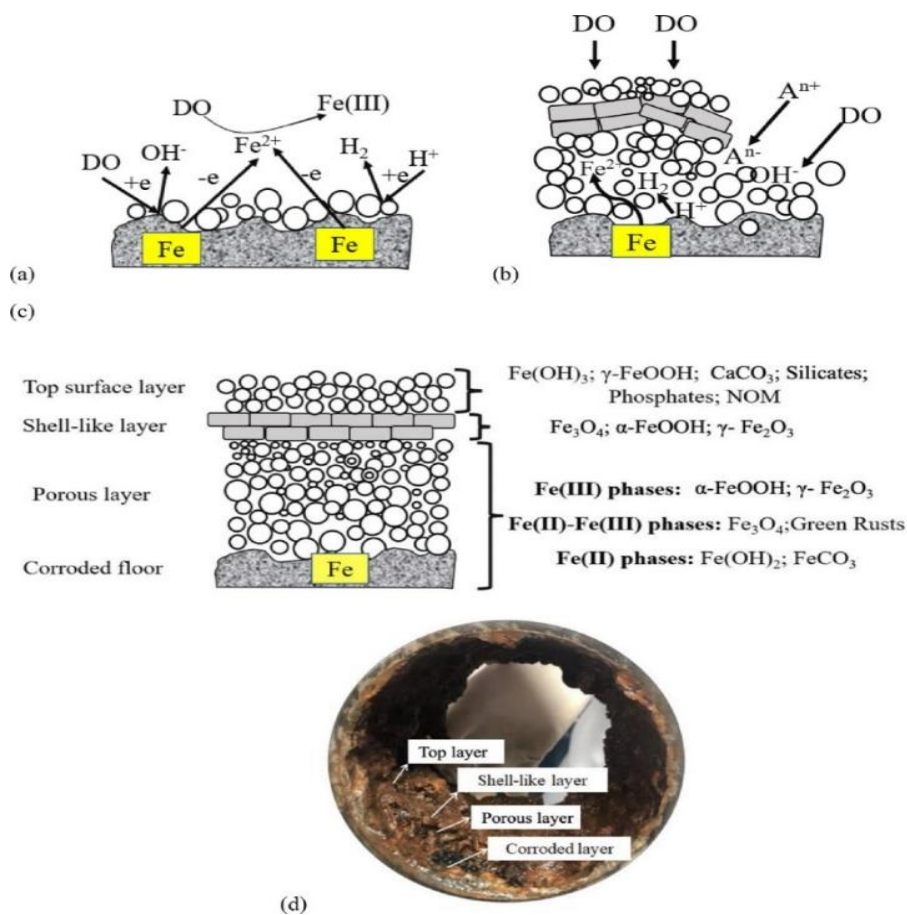


Ilustración 18. Representación de las diferentes etapas de formación de incrustaciones de corrosión: (a) Etapa inicial; (b) Etapa intermedia (c) Etapa estable (d) Incrustación real de tubería de hierro de la ciudad de Hangzhou, China. [25]

Las proporciones de los diferentes componentes se resumen en la *Tabla 2*, comparándolos con el tipo de tubería, la fuente de agua y el tiempo de servicio:

Los resultados de la *Tabla 2* muestran que la proporción de **γ-FeOOH** es elevada en tuberías que han sido utilizadas en un periodo de tiempo corto, y va disminuyendo a medida que aumenta el periodo de servicio. Por el contrario, **α-FeOOH** y **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** se convierten en los principales componentes de las incrustaciones de corrosión en tuberías utilizadas durante largos períodos de servicio, demostrándose que sus proporciones cambiaban a menudo con la calidad del agua transportada.

En cuanto a las energías de formación estándar libre de Gibbs, es de 485,1 kJ/mol para el α-FeOOH, que es menor que la de γ-FeOOH (-471,0 kJ/mol), por lo que la transformación de γ-FeOOH a α-FeOOH es espontánea. [25]

Respecto a la liberación de hierro debido a la desestabilización de las incrustaciones, se produce a menudo cuando una incrustación estable se ve alterada por cambios abruptos en la calidad del agua transportada, bien sea cuando la fuente de agua se cambia de subterránea a superficial o cuando se utiliza una nueva

fuente de agua a través del transporte a larga distancia, como ha ocurrido en varios casos de ciudades importantes como Beijing (China) o Tucson (Arizona). [25]

Tabla 2. Proporciones de componentes de incrustaciones de corrosión formadas por diferentes fuentes de agua (superficial y subterránea) y tuberías de hierro (fundido y dúctil). [25]

Table 1 – Proportion of components of different iron pipe corrosion scales, formed with different transported water conditions.										
Pipe Category	Source water	Operation Times	Proportion of corrosion scale components (%)							Reference
			CaCO <sub>3</sub>	α-FeOOH	β-FeOOH	γ-FeOOH	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Minor Peaks	
DIP	GW	Day 20	19.8	18.1	0	28.1	24	10	/	Zhang et al., (2020b)
		Day 60	23.4	35.7	0	2.3	10.6	28	/	
		Day 90	43.6	17.6	0	1.8	3.9	33.1	/	
CIP	GW	/	0	6.2			22.5	58.3	13	Tang et al., (2006)
	SW	/	0	30.9			47.3	0	21.8	
CIP	SW/GW	20-		34	19	4		43		Yang et al., (2012a)
	SW/GW	25		43	12	3	6	36		
	SW/GW	years		50		5		45		
CIP	GW	20 years		54			29	17		Li et al., (2018)
CIP-Inner layer	SW	30		39			26	35		
CIP-Middle layer		years		43			29	28		
CIP-Outer layer				46			27	27		

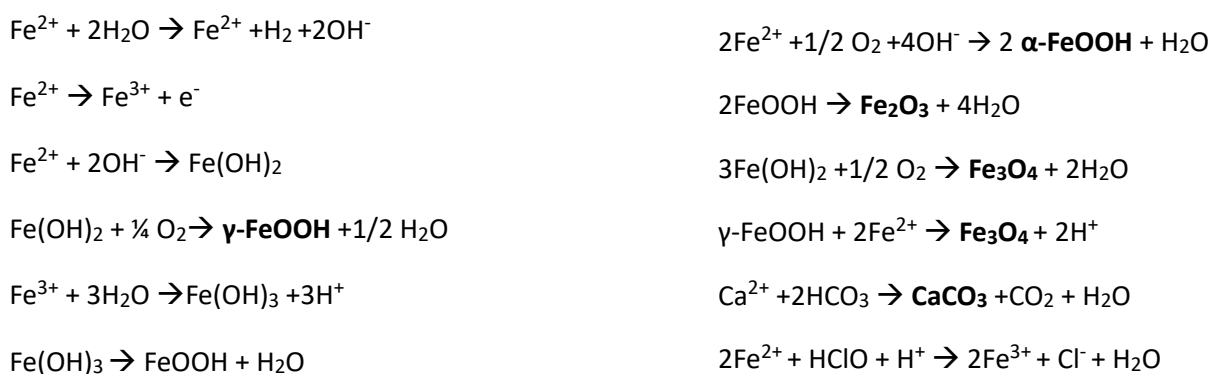
Note: DIP (ductile iron pipes); CIP (cast iron pipes); GW (ground water); SW (surface water).

Los factores que influyen en la calidad del agua transportada desestabilizando las incrustaciones están principalmente asociados con la química de la propia agua (pH, potencial redox y composiciones iónicas) y los procesos biológicos producidos por diferentes comunidades bacterianas.

Como se ha mencionado anteriormente, las características físicas y químicas de las incrustaciones juegan un papel importante respecto a la protección a la corrosión del material de la tubería, así como la liberación de productos al agua transportada.

La siderita **FeCO<sub>3</sub>**, **α-FeOOH** y **γ-FeOOH**, son **inestables y menos protectores**, lo que induce altos niveles de liberación de hierro, mientras que las incrustaciones de corrosión gruesas y compactas con una mayor proporción de **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** son **más estable y reduce la liberación** de hierro en el agua.

Las reacciones producidas son las siguientes, gráficamente representadas en la *Ilustración 19* :





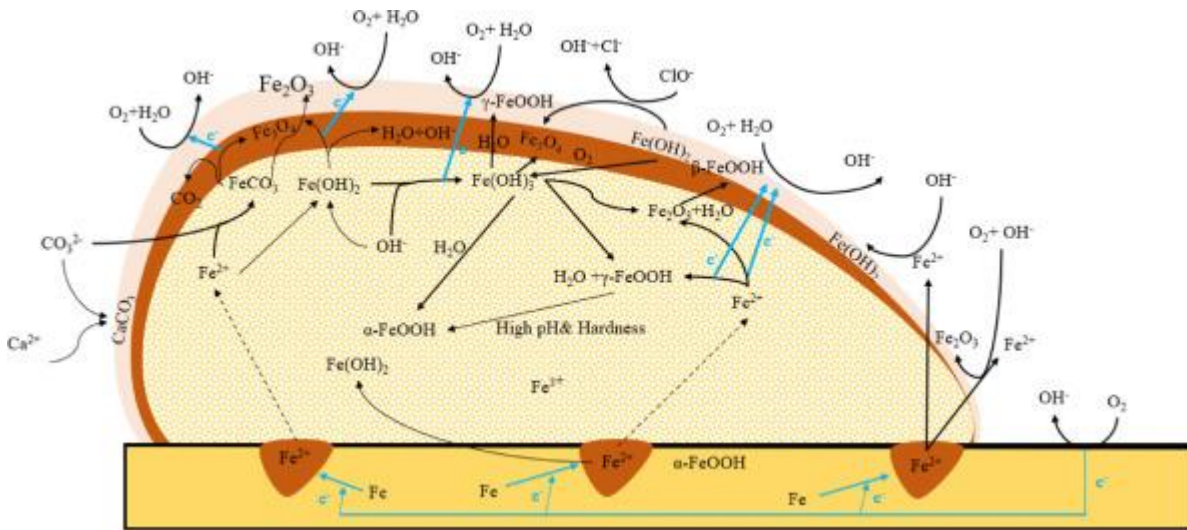


Ilustración 19. Mecanismo de formación de incrustaciones de corrosión en parámetros típicos de calidad del agua. [25]

#### 4.5. Tuberías de materiales férreos galvanizados

Las tuberías de materiales férreos galvanizados se comenzaron a utilizar extensamente a principios del Siglo XX en sistemas de distribución de agua potable, como una alternativa más económica que el cobre, hasta el punto de convertirse en la opción mayoritaria a mediados de siglo. (ver *Ilustración 20*)



Ilustración 20. Tuberías de acero galvanizado.

Sin embargo, con el paso del tiempo dejaron de ser una alternativa fiable debido a sus problemas de corrosión a largo plazo e implementación de nuevos materiales poliméricos, por lo que en la década de los años setenta y ochenta el uso de estas tuberías en nuevas construcciones se redujo considerablemente.

Entre sus características destacan su resistencia mecánica y su resistencia a la corrosión a corto plazo, ya que estudiaremos en profundidad los graves problemas de corrosión tras varios años en servicio.

El recubrimiento de cinc en las tuberías de acero galvanizado se produce introduciéndolas en un baño de cinc fundido a 450°C. El recubrimiento se une químicamente a la base de acero produciéndose una reacción química metalúrgica de difusión, formándose varias capas de aleación cinc-hierro que protegen al metal de la corrosión (ver *Ilustración 21.*) [27] El tratamiento debe seguir la norma ISO 1461, definiendo un espesor mínimo de 45 μm si el espesor de la pared es menor a 1,5 mm, y un espesor mínimo de 70 μm si el espesor supera los 3 mm.

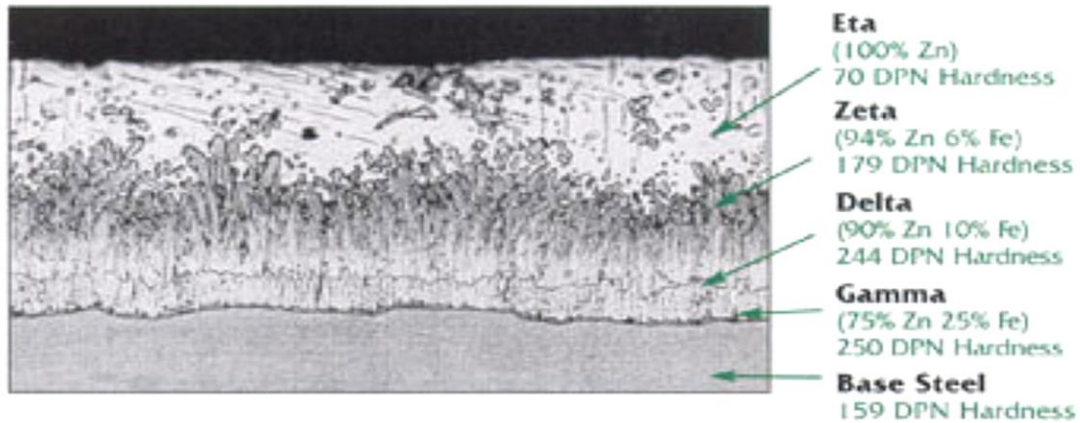


Ilustración 21. Capas de Zn-Fe formadas en el galvanizado. [27]

#### 4.5.1. Factores que influyen en la corrosión de materiales féreos galvanizados en caliente

El riesgo de corrosión de los productos galvanizados depende de la formación de una capa que comienza a formarse sobre la superficie galvanizada al entrar en contacto con el agua. Esta será más protectora cuanto más prevenga los intercambios iónicos y electrónicos entre el metal y el agua.

En general las instalaciones que incorporan productos galvanizados son resistentes al daño por corrosión en condiciones normales. Sin embargo, existen condiciones bajo las que son muy susceptibles, produciéndose la pérdida parcial o total del recubrimiento.

La capa galvanizada está formada por cinc y varias fases de aleaciones cinc-hierro [27], por lo que los productos de corrosión contendrán compuestos de ambos materiales. Cuando no se forma la capa protectora sobre el recubrimiento galvanizado, debido a la alta solubilidad de los compuestos de cinc, las capas en contacto con el agua acaban consistiendo en productos de corrosión de hierro, motivo por el cual no aparecen compuestos de cinc en el análisis del caso experimental que analizamos al final de este trabajo. [6. Análisis de fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio]

En la *ilustración 22* podemos observar la eliminación parcial de la capa protectora de cinc sobre el acero y los productos de corrosión formados en esa zona.

Los distintos tipos de corrosión que pueden sufrir los productos galvanizados son corrosión uniforme, por picaduras, selectiva y galvánica. [29]

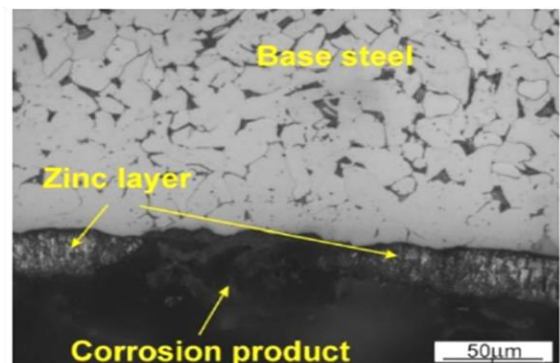


Ilustración 22. Pérdida parcial del recubrimiento de cinc en tubería galvanizada propiciando la corrosión del metal base. [28]

### a) Corrosión uniforme

Este tipo de corrosión en tuberías galvanizadas afecta de manera diferente si la velocidad de corrosión es lenta o rápida. En el primer caso, se produce una capa protectora formada por hidroxicarbonatos de cinc sobre el recubrimiento galvanizado, brindando protección al sistema. El grado de protección de esta capa depende de la concentración de ácido carbónico en el agua. En el caso de que la velocidad de corrosión sea rápida, se produce la pérdida del recubrimiento galvanizado con el paso del tiempo y no se forma la capa protectora sobre esta, por lo que se producen ataques por corrosión en el sistema tales como picaduras, incrustaciones de productos de corrosión de hierro o reducción del diámetro interior. [29]

La formación de capas protectoras se verá además favorecida por la renovación regular del agua y evitando zonas de estancamiento en el sistema. A pesar de esto último, la velocidad de corrosión será menor que bajo condiciones de circulación donde la corrosión se ve incrementada cuanto mayor sea la velocidad de circulación y más bajo sea el pH.

La adición de inhibidores como ortofosfatos, la alcalinización del agua mediante la adición de NaOH y/o  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  o el uso de filtros como mármol o piedra caliza se utilizan con éxito como medidas para decrecer la velocidad de corrosión uniforme.

### b) Corrosión por picaduras

Hay dos tipos distintos de corrosión por picaduras que pueden producirse en los productos galvanizados dependiendo de la temperatura del agua.

En los sistemas de **agua fría** este tipo de corrosión se manifiesta principalmente por la formación de cráteres, que desarrollan incrustaciones reduciendo el diámetro interior de la tubería con el paso del tiempo (ver *Ilustración 23*). Las picaduras pueden perforar la pared debido a pilas de corrosión inducidas por aireación diferencial bajo los depósitos; o por corrosión galvánica cuando entra en contacto con un material más noble.



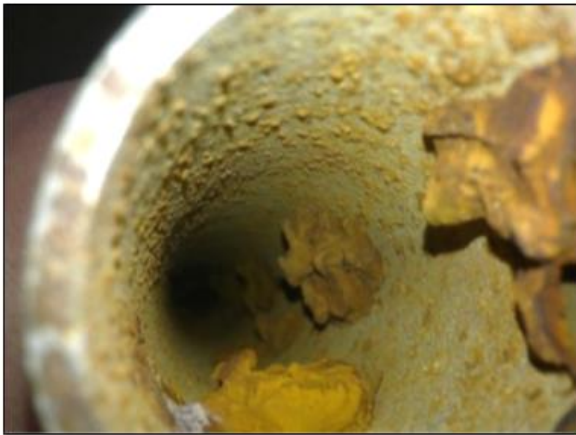
*Ilustración 23. Incrustaciones de corrosión en el interior de una tubería de acero galvanizado de agua fría tras 30 años de servicio.*

Además de los iones solubles de cinc, también se liberan productos de corrosión de hierro procedentes de las picaduras, incrustaciones o a la disolución de la capa de cinc. La concentración analítica de iones de hierro en el agua puede ser extremadamente alta especialmente en largos periodos de estancamiento o alta velocidad de circulación como se demuestra en el apartado [6. Análisis de fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio] -ANÁLISIS DEL AGUA. La presencia de estos

iones aumenta el potencial de corrosión y la conductividad, aumentando el riesgo de corrosión por picaduras

En los sistemas de **agua caliente** a más de 35°C, el inicio de las picaduras está a menudo causado por el ampollamiento, un tipo de corrosión común en recubrimientos galvanizados que causa la corrosión del cinc acompañada de desprendimiento de hidrógeno, produciéndose ánodos de las pilas de aireación diferencial en las áreas donde las ampollas revientan. El ampollamiento se ve favorecido por un aumento de la acidez del agua.

Se caracteriza por picaduras de bordes angulosos en una zona no corroída, desarrolladas a partir de defectos en el recubrimiento metálico, bajo depósitos o en cavernas debido a la formación de óxido de cinc, favoreciendo la reacción catódica de reducción de oxígeno. En la *Ilustración 24* podemos observar productos de corrosión en el interior de una tubería de agua caliente con picaduras en la unión soldada.



*Ilustración 24. A) Tubérculos formados principalmente de  $Fe_2O_3$  en el interior de una tubería de acero galvanizado de agua caliente tras 5 años en servicio. B) Picaduras bajo los tubérculos producidas en el cordón de soldadura. [30]*

Cambios bruscos de temperatura en el sistema pueden causar descascarillado de los productos de corrosión debido los diferentes coeficientes de dilatación del metal base y los productos de corrosión formados.

Las tuberías de acero galvanizado de agua caliente en circulación muestran más corrosión que en agua fría y que en agua caliente estancada. [31]

Se debe tener en cuenta **las condiciones superficiales del metal**, donde por ejemplo una superficie rugosa es más susceptible a formar ánodos locales que una lisa, por lo que la calidad de las tuberías debe ser Tipo A de acuerdo con la Norma EN 10240. Además, una forma irregular del cordón de soldadura puede provocar puntos anódicos por lo que debe mecanizarse. Las calidades del acero deben limitar además el contenido de azufre para evitar la corrosión en resquicio producida en ciertas fases que contienen este elemento.

Respecto a la influencia de las **características del agua** se consideran las reacciones anódicas y catódicas de forma separada. Pequeños cambios en la composición del agua pueden tener una enorme influencia en la velocidad de corrosión [27]. La naturaleza y concentración de aniones influyen en la reacción anódica. Mientras que los aniones cloruros, nitratos y sulfato no ralentizan la disolución anódica, los iones bicarbonato si pueden inhibirla tamponando la acidez causada por la hidrólisis del cinc o los aniones de hierro formados en las picaduras.

La influencia de los aniones se determina por la relación de concentración  $S_1$ .

$$S_1 = \frac{c(\text{Cl}^-) + c(\text{NO}_3^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{HCO}_3^-)}$$

El riesgo se aumenta cuando se incrementan los valores de  $S_1$ , siendo poco probable con  $S_1 < 0,5$  y muy probable con  $S_1 > 3$ .

Métodos como la filtración mediante membranas selectivas pueden reducir el riesgo alterando la relación de concentraciones. [29]

Como posibles soluciones, iones bicarbonato y fosfato en combinación con los cationes calcio pueden actuar como inhibidores catódicos debido a la formación de capas no conductoras de carbonato o fosfato cálcicos con concentraciones  $c(\text{HCO}_3) \geq 2,0$  mmol/l y  $c(\text{Ca}^{2+}) \geq 0,5$  mmol/l. Asimismo, la corrosión por picadura no se produce con  $c(\text{O}_2) \leq 0,003$  mmol/l.

Como **medidas preventivas** es importante evitar la formación de puntos anódicos en uniones roscadas, empleando una cantidad óptima de compuesto de unión, eliminar esquirlas o virutas que puedan inducir a procesos de corrosión.

La corrosión por picaduras se favorece en aguas estancadas debido a la estabilización de los ánodos locales, potenciándose en ellos la corrosión una vez estabilizados por la circulación de agua, debido a que se facilita el transporte de oxígeno.

### c) Corrosión selectiva

Producida principalmente en agua fría, se caracteriza por una corrosión preferente a lo largo de los bordes de grano en la capa de cinc del recubrimiento, formando una capa gruesa de productos de corrosión poco adherente que pueden transferir partículas granulares al agua compuestas de productos de corrosión sólidos que puede contener cinc metálico o aleación cinc-hierro. Después de la eliminación del recubrimiento metálico, la corrosión avanza normalmente de manera general no uniforme.

Respecto a la influencia de las características del agua, el riesgo está influenciado de diferentes formas por la concentración de iones nitrato inhibidores y de iones cloruro y sulfato estimuladores.

La corrosión selectiva ocurre cuando la concentración de iones nitrato es lo suficientemente alta como para pasivar la superficie del grano de cinc, pero no lo suficientemente alta para pasivar también los bordes de grano, que se ven atacados por el poder activador de los iones cloruro y/o sulfato. [29]

$$S_2 = \frac{c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{NO}_3^-)}$$

La relación de concentración  $S_2$  caracteriza el riesgo por estos iones, considerándose bajo cuando  $S_2 < 1$  o  $S_2 > 3$ ; o cuando  $c(\text{NO}_3^-) < 0,3$  mmol/l.

#### d) Corrosión bimetálica o galvánica

La corrosión galvánica en las tuberías galvanizadas ocurre cuando entran en contacto con metales que tienen un potencial de corrosión más positivo como el cobre o acero inoxidable, produciendo polarización anódica al galvanizado, aumentando así el riesgo por picaduras en agua fría y caliente.

Por ejemplo, se ha demostrado que la precipitación de iones cobre en la superficie galvanizada interna de la tubería provenientes de elementos de cobre de termos o calentadores de agua, forman celdas galvánicas donde el cinc con carácter anódico se disuelve, eliminándose localmente la protección y produciendo picadura del metal base. El daño se ve incrementado con una concentración de cobre de 100 µg/l y temperatura mayor a 60°C. [32]

Respecto a la composición del agua, un incremento en la conductividad eléctrica incrementa el riesgo de corrosión bimetálica. Sin embargo, aunque la presencia de bicarbonato cálcico incremente la conductividad, disminuye el riesgo de corrosión mediante la precipitación de capas de carbonato cálcico inhibitoras en el metal más noble.

La relación de superficies ánodo-cátodo y la geometría son los factores de diseño que influyen en este tipo de corrosión.

En el caso del acero inoxidable, cuya resistencia a la polarización es alta, puede conducir a corrosión bimetálica especialmente si la relación de superficie ánodo/cátodo es grande.

### 4.6. Tuberías de acero inoxidable

Debido a su elevado coste, las tuberías de acero inoxidable solo se utilizan en casos críticos donde el riesgo de corrosión es extremadamente alto. La Norma EN 10312 especifica las calidades de acero inoxidable adecuadas para el transporte y suministro de agua potable. Entre los más comunes destacan los austeníticos AISI 304, AISI 304L, AISI 316, AISI 316L; los ferríticos AISI 409L y el dúplex 2304.



Ilustración 25. Tuberías de acero inoxidable.

A pesar de que con un 10,5% de cromo se consigue la pasivación del acero inoxidable, estas calidades de tuberías presentan como mínimo un 16%. [33]

En la *Tabla 3* podemos diferenciar las composiciones elementales del acero inoxidable 304 y 316. La principal diferencia es el mayor contenido en níquel y la adición de molibdeno en el 316, incrementando así su resistencia a la corrosión.

*Tabla 3. Composición elemental de los aceros inoxidables 304 y 316. [34]*

Chemical composition of stainless steels.

Steel type	C	P	Mn	Si	S	Ni	Cr	Mo
304	0.08	0.04	1.65	0.02	0.03	9.45	18.25	-
316	0.08	0.04	1.95	0.50	0.03	10.30	17.65	1.68

Respecto a su fabricación, a diferencia del acero galvanizado, el acero inoxidable obtiene su resistencia a la corrosión mediante la adición de cromo y otros elementos aleantes directamente en la composición del acero durante el proceso de fusión, produciéndose una capa de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en su superficie (ver *Ilustración 27*).

#### 4.6.1 Factores que influyen en la corrosión del acero inoxidable

Debido a su estado pasivo gracias a la presencia de cromo en su composición, son los materiales más nobles en sistemas mixtos, por lo que apenas existe riesgo de corrosión bimetalica. La corrosión uniforme e intergranular es también despreciable. Sin embargo, en el caso de que la capa pasiva sea localmente destruida puede aparecer corrosión por picaduras, en resquicio, bajo tensión y por fatiga. [35]

##### a) Corrosión por picaduras

Se produce solamente si el potencial redox del agua es más positivo que el de iniciación de picaduras. El riesgo por picaduras disminuye con el incremento en su composición de cromo, molibdeno y nitrógeno y aumenta con el contenido de azufre.

Respecto a las características del agua, el riesgo se incrementa con la presencia de iones cloruro. Para aceros ferríticos y austeníticos sin molibdeno el riesgo aumenta en agua fría con una concentración ( $\text{Cl}^-$ ) > 6 mmol/L y 1,5 mmol/L para agua caliente.

Además, el aumento de la temperatura del agua, las condiciones de estancamiento y daños mecánicos o rugosidad en la superficie favorecen el inicio de picaduras.

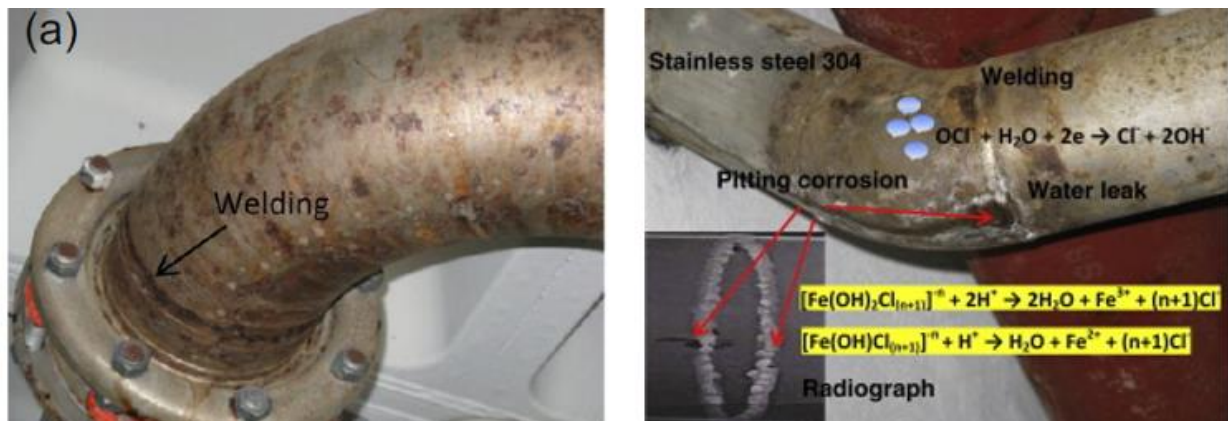


Ilustración 26. Corrosión por picaduras y en la soldadura transversal en una tubería de acero inoxidable 304 tras 12 años en servicio. [34]

En la *ilustración 26* podemos observar la corrosión por picaduras en una tubería de acero inoxidable 304. El motivo fue una incorrecta soldadura del tubo (superficie rugosa y florecida debido al no uso de gas formador dentro de la tubería) que produjo corrosión de dentro hacia afuera, además de una elevada humedad relativa en el ambiente debida a los tanques de agua donde el ion hipoclorito, que induce a la formación del ion cloruro, se condensaba en la superficie externa, dando lugar a picaduras generalizadas en la superficie. [34]

### b) Corrosión en resquicio

Producida por formación de una pila en el interior de las cavidades formadas por picaduras, en roscas o bajo depósitos. Los factores de riesgo son muy similares a las del apartado a), teniendo en cuenta que puede producirse a niveles de cloruro y temperaturas más bajas. Un correcto diseño y construcción del sistema que evite zonas muertas es crítico para evitar este tipo de corrosión.

### c) Corrosión bajo tensión

Manifestada en forma de grietas normalmente transgranulares como resultado de la influencia simultánea de un agente de corrosión específico (corrosión por picaduras, cavernosa, en hoja de cuchilla o fatiga) y esfuerzos de tracción (esfuerzos residuales, de construcción, de operación y térmicos).

Altos contenidos de níquel, cromo, molibdeno y nitrógeno disminuyen el riesgo, siendo los aceros inoxidables ferríticos los más resistentes. La presencia de iones cloruro en el agua incrementa el riesgo.

Por lo tanto, unas correctas condiciones de operación y construcción que minimicen los esfuerzos en la instalación reducen enormemente el riesgo.

### d) Corrosión fatiga



Manifestada en forma de grietas como resultado de la influencia simultánea de corrosión y esfuerzos cíclicos. Se manifiesta sobre todo en sistemas de agua caliente debido a la dilatación y contracción térmica del material con la variación de temperatura. No existe además relación estrecha con la concentración de iones cloruro.

## 4.7. Tuberías de plomo

El plomo fue un material altamente utilizado en la plomería hasta los años setenta del Siglo XX donde se prohibió en la mayoría de los países debido a su alta toxicidad (ver *Ilustración 27*).



*Ilustración 27. Tubería de plomo.*

Su consumo afecta al neurodesarrollo de los niños, hipertensión, la función renal o fertilidad, por lo que ocupa el puesto número dos en la lista de prioridades de sustancias tóxicas de la ATSDR 2023, solo después del arsénico que ocupa el número uno. [36]

Su uso en la plomería comenzó en el Imperio Romano donde muchos historiadores relacionan su caída con el alto consumo de plomo consumido durante su civilización.

La principal fuente de plomo en una tubería de plomo es la propia tubería. Los accesorios de latón y las conexiones de soldadura de plomo también proporcionan cantidades significativas a lo largo del tiempo en el agua potable.

Según la normativa española, el Real Decreto 140/2003 establece los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano en España. En este decreto, se establece que el límite máximo permitido de plomo en el agua potable es de 10 microgramos por litro ( $\mu\text{g/L}$ ). [37]

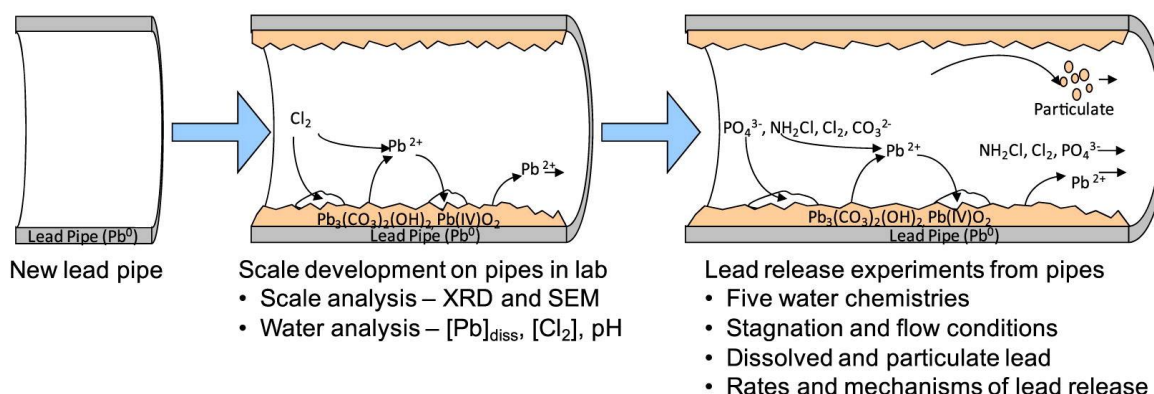
### 4.7.1. Factores que influyen en la corrosión del plomo

Los factores que controlan la liberación de plomo de los productos de corrosión en las paredes internas de las tuberías son:

**1. Parámetros de la química del agua:** pH, alcalinidad, contenido de carbono inorgánico disuelto, presencia de desinfectantes (cloro, cloramina, oxígeno disuelto), presencia de inhibidores de corrosión (ortofosfato, sílice, o mezcla de ortofosfato y polifosfato), potencial de reducción de oxidación y presencia de materia orgánica.

**2. Régimen de flujo:** velocidad de flujo y tiempo de estancamiento; lavado de tuberías:

Las incrustaciones de corrosión de plomo son una estructura compleja formada por muchos compuestos metálicos diferentes en diferentes capas, donde pueden aparecer metales pesados como el vanadio, antimonio, cobre, manganeso y cromo.



*Ilustración 28. Efecto del flujo y química del agua en la liberación de plomo en las incrustaciones de tuberías de agua potable. [38].*

En presencia de compuestos oxidantes, el plomo metálico reacciona con el agua para formar hidróxido de plomo **Pb(OH)<sub>2</sub>**. A continuación se forma plomo blanco, un carbonato de plomo alcalino compuesto con alta toxicidad llamado hidrocerusita **2PbCO<sub>3</sub>Pb(OH)<sub>2</sub>**, principal componente de corrosión cristalina de plomo. Además, es común encontrar cerusita (**PbCO<sub>3</sub>**), **Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** y **PbO<sub>2</sub>**, siendo este último protector contra futura corrosión (ver *Ilustración 28*). [38]

Se ha observado experimentalmente que los niveles más altos de plomo en el agua van acompañados a menudo de altas concentraciones de hierro. El plomo junto con el hierro y la materia orgánica natural presente en el medio ambiente forma partículas coloidales que se desprenden y transportan fácilmente en los sistemas de distribución de agua potable, cuya solubilidad y desprendimiento en el agua aumenta con la disminución del pH.

Además de encontrarse distintos materiales en las incrustaciones de corrosión de las tuberías de plomo, también pueden encontrarse microorganismos como reductores de sulfato, de nitrato, oxidantes de nitrito, de amoníaco y de azufre.

Respecto al uso de desinfectantes, la cloramina produce un aumento de la corrosión de las tuberías de plomo, ya que la capa de **PbO<sub>2</sub>** se desestabiliza en presencia de este compuesto, por lo que es más conveniente utilizar cloro según el caso.

Para reducir la concentración de plomo en los sistemas de distribución y en el agua potable, además de aumentar el pH a niveles casi neutros, el lavado de tuberías es eficiente siempre y cuando se realice en periodo de tiempos cortos. La adición de inhibidores de la corrosión como ortofosfatos o su mezcla con polifosfato son también eficientes. En el caso de utilizar ortofosfatos, se forma una fase sólida amorfa

compuesta principalmente por plomo, aluminio, fósforo y hierro, que no es muy estable y puede desprenderse fácilmente cuando se producen perturbaciones en condiciones de flujo.

Se cree que el efecto del ortofosfato se debe a la precipitación de sólidos de fosfato de plomo, como la hidroxilpiromorfita  $Pb_5(PO_4)_3(OH)$ , que disminuyó drásticamente la tasa neta de liberación de plomo durante la disolución de hidrocerusita en soluciones con ortofosfato. El manual de orientación del LCR (Regla de Plomo y Cobre de USA) recomendó un rango de pH óptimo de 7,2 a 7,8 para el tratamiento con ortofosfato.

En cuanto al régimen de flujo, el flujo del agua produce mayor liberación de plomo que en estancamiento siendo en las primeras 24 horas donde se produce la mayor liberación. Esto ocurre intercambiándose el agua dentro o adyacente a las incrustaciones porosas de los productos de corrosión con el agua.

La velocidad de flujo también influye en la liberación de plomo de varias maneras, como en los mecanismos de erosión de los productos de corrosión mediante el desprendimiento de partículas ricas en plomo y en el desarrollo de incrustaciones en las tuberías, aumentando significativamente la concentración total de plomo. [1]

Es común encontrar plomo en incrustaciones de corrosión de materiales férricos o incluso en tuberías de acero galvanizado. Diversos artículos y documentos afirman que los recubrimientos galvanizados pueden contener un mínimo de 0,5% de plomo que puede ser significativo pasando al agua a largo plazo. Análisis de superficies de varias tuberías galvanizadas instaladas desde 1950 a 2008 han demostrado una concentración de plomo en el recubrimiento de cinc desde hasta 0 hasta el 2% dependiendo de los productores.

#### 4.8. Tuberías de hormigón armado y cemento

El hormigón y el mortero de cemento siguen siendo materiales comunes en la distribución de grandes volúmenes de agua potable en las redes de distribución.

La diferencia entre los dos materiales radica en que el hormigón además de arena, cemento y agua, contiene grava, lo que le permite ser utilizado para la construcción estructural de tuberías debido a sus buenas propiedades mecánicas, destacando la durabilidad, capacidad de soportar tensiones externas como los movimientos del subsuelo o el tráfico de vehículos y las presiones interna generadas por el agua.



Ilustración 29. Tubería de hormigón.

Por el contrario, el mortero de cemento es utilizado como revestimiento interior de tuberías debido a su alta trabajabilidad, adherencia y su alto pH, creando un ambiente alcalino cerca de las paredes de la tubería disminuyendo así la velocidad de corrosión.

El inconveniente de las tuberías de hormigón es su dificultad de instalación y transporte debido a su elevado peso, por lo que su uso ha disminuido en los últimos años debido a la implementación de materiales más modernos, principalmente los polímeros.

Las tuberías de hormigón armado presentan una estructura de acero corrugado, en forma de barras o malla metálica, proporcionándole resistencia tanto interna como externa a la tubería. La estructura metálica está protegida por una capa pasiva formada por la alta alcalinidad del hormigón, con un pH superior a 12, pero puede ser susceptible a la corrosión al filtrarse agentes agresivos presentes en el agua o el ambiente mediante grietas o poros alcanzando el metal, destruyendo parte de su capa pasiva y produciendo corrosión. [40][41] Los productos de corrosión formados en la interfaz son voluminosos y afectan a la integridad de la estructura propiciando la formación de grietas, pérdida de adherencia acero-hormigón y capacidad portante debido a la reducción de la sección transversal del acero. [40]

#### 4.8.1. Factores que influyen en la corrosión del hormigón armado

La corrosión del acero es la principal causa de deterioro de las tuberías de hormigón armado. La interfaz acero-hormigón es de elevada importancia en el inicio de la corrosión (normalmente localizada), siendo la **estructura de poros en la interfaz y el contenido de agua los dos principales factores** que influyen en el proceso [40]. La corrosión de las barras de acero es un proceso electroquímico que implica la disolución anódica del hierro y la reducción catódica del oxígeno. Este fenómeno se desarrolla bajo la influencia de agentes agresivos como el CO<sub>2</sub> y el Cl<sup>-</sup>, que se infiltran en el hormigón debido a su microestructura porosa hasta la armadura, donde es atacada. Los productos de corrosión resultantes precipitan y generan tensiones de tracción formando grietas en la tubería disminuyendo así la vida útil del sistema y permitiendo la entrada de agentes agresivos. (ver *Ilustración 30*)

Reacción anódica:  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2 \text{e}^{-}$

Reacción catódica:  $2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^{-} \rightarrow 4\text{OH}^{-}$

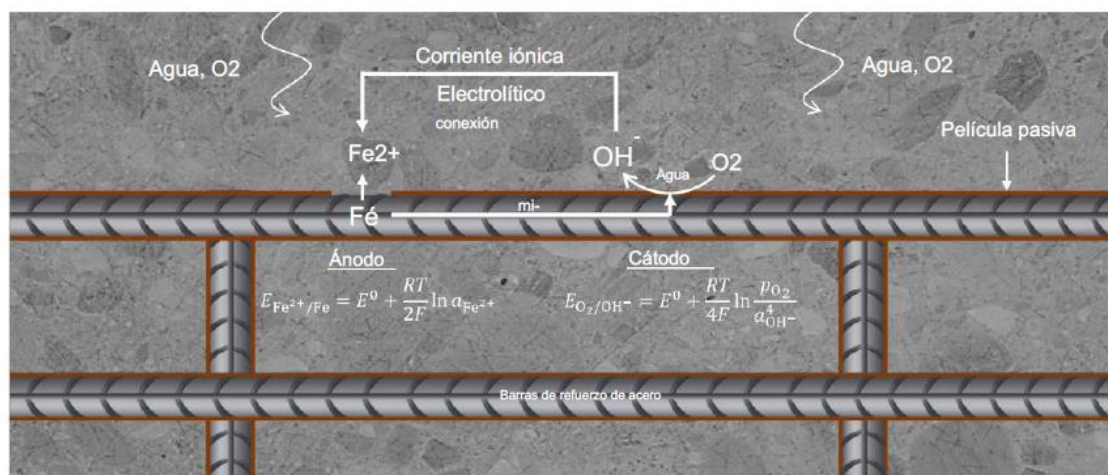


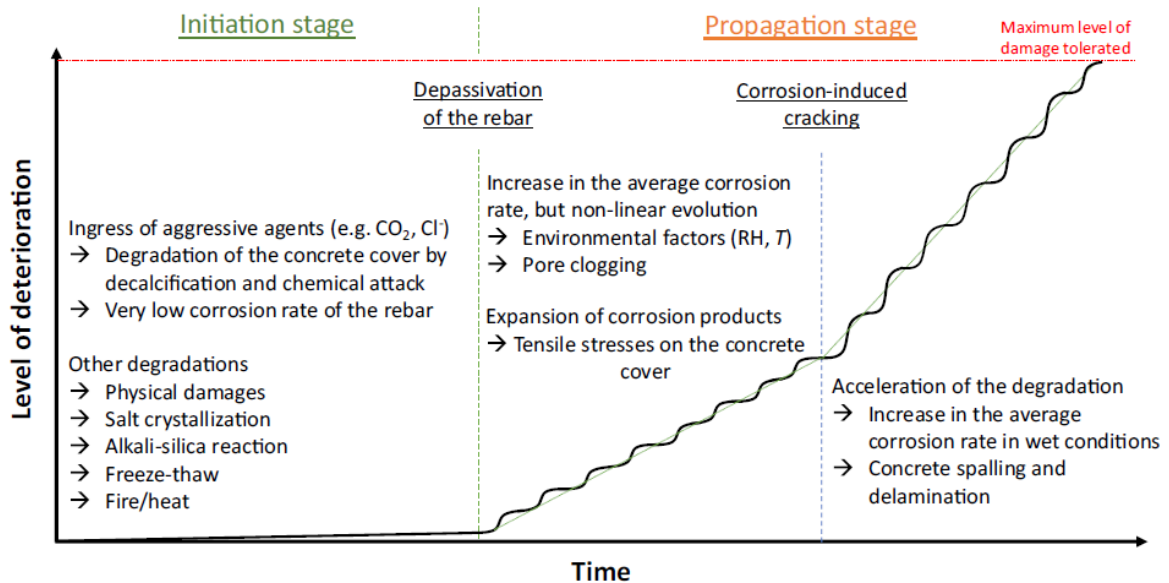
Ilustración 30. Representación esquemática de la corrosión del acero corrugado en el hormigón, involucrando la oxidación del hierro, la reducción del oxígeno y la conexión eléctrica y la corriente iónica en los sitios anódicos y catódicos. [41]

La microestructura de la pasta de cemento es altamente heterogénea presentando poros capilares. Además de la porosidad, las grietas también son importantes en la microestructura del hormigón causadas por procesos físicos y químicos como contracción, fluencia, variaciones térmicas o reacciones químicas expansivas.

Respecto a las barras de refuerzo de acero, su función es mejorar las propiedades mecánicas de la estructura aumentando la resistencia a tracción, a crecimiento de grietas y ductilidad. Presentan una superficie corrugada para mejorar la unión con el hormigón, estando compuestas normalmente por acero al carbono, aunque se pueden utilizar acero galvanizado, acero inoxidable o acero aleado con menor frecuencia. El estado superficial inicial del metal y la distribución del óxido nativo formado después de su fabricación son parámetros críticos que controlan la susceptibilidad a la corrosión en contacto con el hormigón. [39][40] [41] [42].

La interfaz acero-hormigón es la parte más importante a la hora de determinar los mecanismos de corrosión del refuerzo de acero. Una vez en contacto con el hormigón, se forma una capa protectora sobre la superficie debido a la alta alcalinidad del entorno producida por la hidratación del cemento en el hormigón recién preparado y la posterior liberación de  $Ca(OH)_2$ . La película pasiva tiene un espesor de 10-15 nm y está compuesta por óxidos protectores (magnetita ( $Fe_3O_4$ ), maghemita ( $\gamma-Fe_2O_3$ ) y hematita ( $\alpha-Fe_2O_3$ )) sobre los que se encuentran oxihidróxidos de hierro (goethita ( $\alpha-FeOOH$ ), lepidocrocita ( $\gamma-FeOOH$ ) y akaganeita ( $\beta-FeOOH$ )) [42] [43] (película pasiva representada en color rojo en las ilustraciones 32, 33 y 34). Las reacciones químicas con las mismas que las que aparecen en el apartado 4.4. [Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable.](#)

La vida útil de las estructuras de hormigón armado, incluyendo a las tuberías de distribución de agua, se dividen en dos periodos: una primera etapa de iniciación y otra etapa de propagación. (Ver *Gráfica 2*)

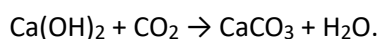


Gráfica 2. Representación esquemática de la vida en servicio de estructuras de hormigón armado adaptadas del diagrama de Tuutti. [41]

La primera etapa corresponde a la entrada de agentes agresivos como CO<sub>2</sub> y Cl<sup>-</sup> produciendo la ruptura de la película pasiva en las barras del acero, mientras que la etapa de propagación corresponde con el estado activo de la corrosión hasta alcanzar el límite de daño tolerado por las normas de construcción.

La corrosión del acero se considera en estado pasivo si la densidad de corriente es inferior a 0.1 mA cm<sup>2</sup> y en estado activo para valores superiores. [42]

Los mecanismos de iniciación de la corrosión en las barras o mallas de acero están principalmente iniciados por la carbonatación y la presencia de cloruros. La carbonatación es la reacción entre el CO<sub>2</sub> y las fases hidratadas que contienen calcio, formando CaCO<sub>3</sub>, disminuyendo el pH del hormigón de 13 a un valor menor de 9, disolviendo la capa pasiva de las barras de refuerzo. El CO<sub>2</sub> atmosférico o presente en el agua puede penetrar en la superficie del hormigón por absorción en poros capilares interconectados y difusión a través de la red de poros y microfisuras. El CO<sub>2</sub> se disuelve en el agua de los poros formando ácido carbónico H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> que se disocia en HCO<sup>3-</sup> Y CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.



El contenido de agua y la distribución del tamaño de los poros en las proximidades del acero son los principales factores influyentes. (ver *Ilustración 31.*) [41]

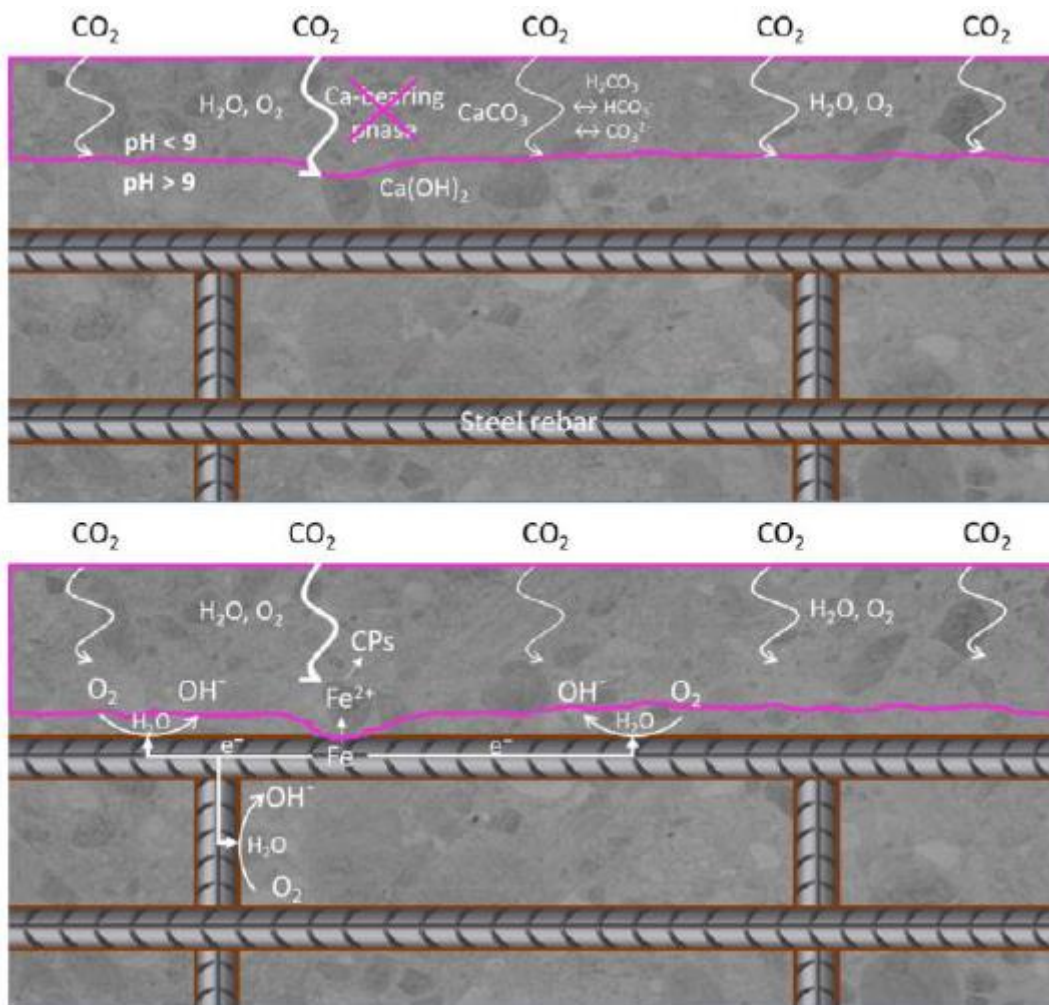


Ilustración 31. Representación esquemática del mecanismo de corrosión inducida por carbonatación de las barras de acero en el hormigón. [41]

Respecto a la corrosión inducida por **cloruros**, la penetración de los iones Cl<sup>-</sup> se produce principalmente a través de los poros capilares o de defectos de la superficie del hormigón. Una vez entra en contacto con la película pasiva, la disuelve anódicamente produciendo pequeñas picaduras en el refuerzo de acero. En la *ilustración 32* podemos observar el mecanismo de corrosión inducida por cloruros. En el caso de bajo contenido de cloruros, se produce una sucesión de despasivación/reposivación debido a la precipitación de Fe(OH)<sub>2</sub> en la picadura.

Por el contrario, con alto contenido de cloruros aparecen zonas anódicas y catódicas bien definidas, donde el cloruro migrará al ánodo aumentando el ataque, mientras que los iones de hierro migrarán al cátodo en una región rica en oxígeno donde precipitarán. El resultado es un ambiente agresivo en la picadura que continuará creciendo.

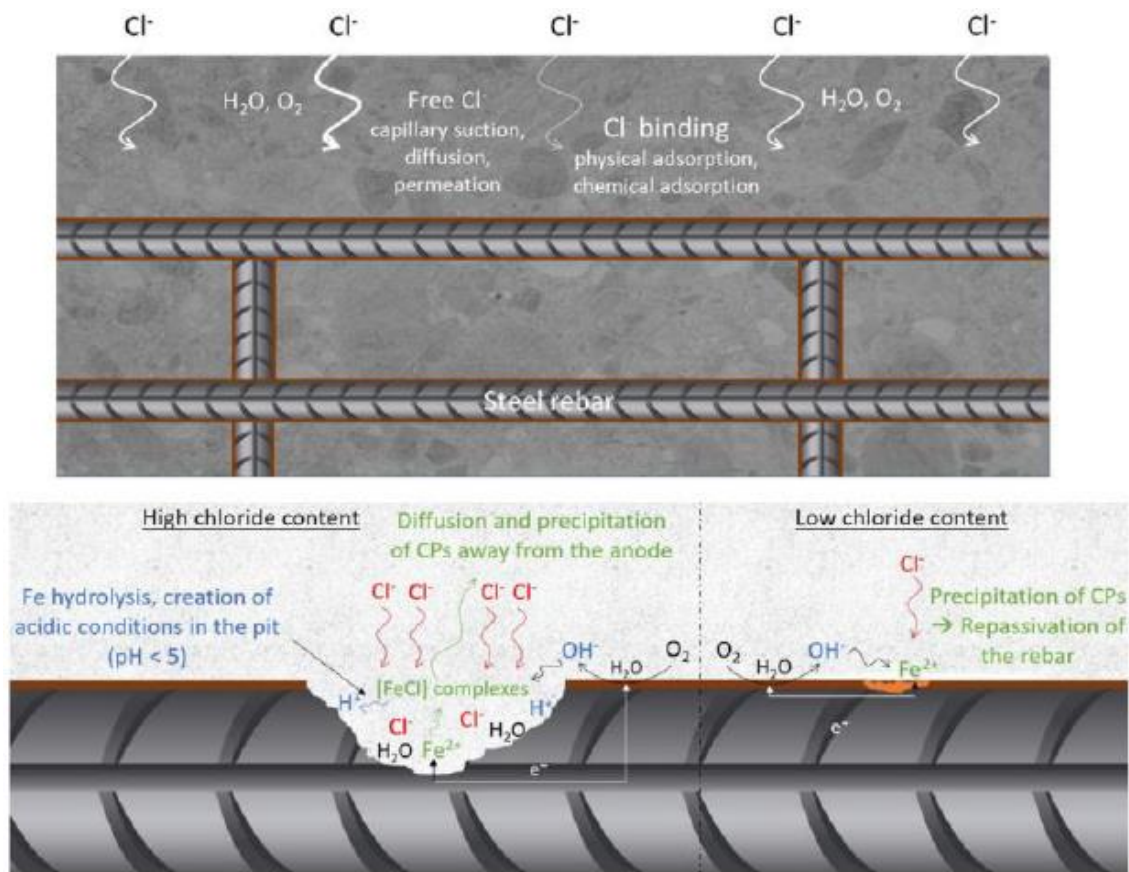


Ilustración 32. Representación esquemática del mecanismo de corrosión inducida por cloruros de las barras de acero en el hormigón. [41]

En la *Tabla 4* podemos observar los distintos óxidos e hidróxidos formados como productos de corrosión en el hormigón armado y su expansión de volumen.

*Tabla 4. Lista de productos de corrosión formados en el hormigón armado y su expansión volumétrica. (NC=desconocida) [41]*

List of possible iron corrosion products in concrete with their volume expansion (NC = unknown).

Corrosion products	Formula	Valence	Volume expansion
Iron(II) hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Fe(II)	3.7
Chukanovite	$\text{Fe}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$		NC
Siderite	$\text{FeCO}_3$		NC
Ferrous hydroxychloride	$\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$		NC
Chloride green rust	$\text{Fe}_3^{\text{II}}\text{Fe}^{\text{III}}(\text{OH})_8\text{Cl}, 2 \text{H}_2\text{O}$	Fe(II-III)	NC
Carbonate green rust	$\text{Fe}_4^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}(\text{OH})_{12}\text{CO}_3, 2 \text{H}_2\text{O}$		NC
Sulphate green rust	$\text{Fe}_4^{\text{II}}\text{Fe}_2^{\text{III}}(\text{OH})_{12}\text{SO}_4, 8 \text{H}_2\text{O}$		NC
Magnetite	$\text{Fe}_3\text{O}_4$		2.1
Hematite	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	Fe(III)	2.1
Maghemite	$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$		2.4
Iron(III) hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_3$		4.2
Ferrihydrite	$\text{Fe}_2\text{O}_3, 3 \text{H}_2\text{O}$		6.5
Goethite	$\alpha\text{-FeOOH}$		3.0
Akaganeite	$\beta\text{-FeOOH} (\beta\text{-FeO}_{1-x}(\text{OH})_{1+x}\text{Cl}_x)$		3.5
Lepidocrocite	$\gamma\text{-FeOOH}$		3.2
Feroxyhyte	$\delta\text{-FeOOH}$		2.8



#### 4.8.2. Factores que afectan a la lixiviación de compuestos del hormigón y mortero de cemento

Las tuberías de hormigón y cemento se ven principalmente afectadas por el proceso de lixiviación de algunos de sus compuestos que se liberan inmediatamente después de la instalación de las tuberías nuevas o después de la rehabilitación de tuberías viejas.

La disolución de estos compuestos tiene lugar en los poros de la pared de la tubería donde el agua líquida que penetra disuelve los compuestos difundiendo posteriormente a la corriente de agua en contacto.

La cantidad de agua que se difunde a través de los poros depende de la permeabilidad del material, teniendo el agua blanda mayor capacidad de disolución que la dura. La **tasa de lixiviación** depende de varios **factores** como el tiempo que lleva la tubería en funcionamiento, la permeabilidad del material, la suavidad del agua potable y la solubilidad del compuesto lixiviado.

Debido a que la industria del cemento es una de las más contaminantes del mundo en cuanto a nivel de CO<sub>2</sub> producido, se han utilizado productos de desecho como combustible alternativo en los hornos de cemento, entre los que destacan neumáticos fuera de uso (NFU), lodos de depuradora solidificados o combustibles derivados de residuos (CDR). La utilización de este tipo de combustibles reduce el consumo de combustibles fósiles y contribuye a la gestión de residuos. Sin embargo, los abundantes metales pesados que contienen se ven reflejados en la composición final del cemento, ya que cuando son calcinados pueden volatilizarse y condensarse posteriormente en las partículas del Clinker. Todos estos combustibles alternativos contienen cantidades significativas de metales pesados.

Diversos estudios experimentales mostraron que los iones más susceptibles de ser lixiviados en las tuberías de hierro y acero recubiertas de cemento fueron el calcio, aluminio, cromo, plomo y cadmio, siendo el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> el compuesto más soluble. [44]

Por este motivo es recomendable utilizar biomasa o residuos de procesos madereros como combustible para reducir la cantidad de metales pesados y químicos contaminantes en el producto final.

Otro parámetro que afecta a la lixiviación de compuestos del revestimiento de cemento es la dosis de desinfectante presente en el agua potable, donde al aumentar su concentración se produce mayor lixiviación de elementos al agua.

En el caso del cloro, puede reaccionar fácilmente con el hidróxido de calcio (compuesto más disuelto en las tuberías de cemento) para formar hipoclorito de calcio soluble en el agua además de ácido clorhídrico e hipocloroso que pueden ser incluso más dañino para la estructura de cemento.

Las tuberías de **asbesto y cemento (AC)** dejaron de utilizarse por ley en España y en la Unión Europea en diciembre de 2001 debido a que en su manipulación y desgaste desprendía **fibras de amianto** altamente cancerígenas, tanto en el agua como en el aire.

En un estudio sobre tuberías envejecidas de fibrocemento se observó corrosión superficial debido a la liberación de calcio de la pared de la tubería debido principalmente a una variación estacional de temperatura, en la que el agua fría aumentaba la lixiviación de calcio acelerando así el desprendimiento de fibras de asbesto al agua potable y disminuyendo las propiedades mecánicas de la tubería. [45]

Otro estudio en Nueva Zelanda demostró la presencia de 0,9 millones de fibras de amianto largas (>10 µm) por litro de agua y 6,2 millones de fibras cortas (<0,5 µm), resultando un volumen muy elevado y altamente perjudicial, por lo que se están reemplazando por materiales más seguros como polímeros o metales. [46]

#### 4.9. Tuberías poliméricas. Alternativa a los materiales metálicos por sus problemas de corrosión.

El empleo de tuberías poliméricas ha aumentado enormemente en las últimas décadas hasta llegar al punto de ser el tipo de material más utilizado actualmente en las viviendas de los países desarrollados.

Este incremento en los sistemas de distribución de agua potable se debe principalmente a las mejoras en los procesos de producción, su bajo coste, su ligereza y manejabilidad a la hora de transportarlos e instalarlos, menor mantenimiento, así como una mayor resistencia a la corrosión en comparación con los materiales históricamente utilizados.

Los materiales plásticos más utilizados para las tuberías son el polietileno **PE** (alta HDPE y baja densidad LDPE), polietileno reticulado **PEX**, cloruro de polivinilo **PVC**, cloruro de polivinilo no plastificado **PVC-U**, orientado **O-PVC**, clorado **C-PVC** y de alto impacto **HI-PVC**.

##### 4.9.1. Propiedades generales de las tuberías poliméricas y comparación con los materiales tradicionales

A continuación, mencionaremos las propiedades y ventajas generales que presentan las tuberías poliméricas en comparación con los materiales metálicos y el hormigón.

**1. Densidad.** Sus densidades son muy inferiores en comparación con el resto de los materiales tradicionales. Por este motivo, su transporte es mucho más económico y no suele ser necesario emplear medios auxiliares para su manipulación y montaje (ver *Tabla 5*). [47]

*Tabla 5. Comparativa de distintas densidades de materiales empleados para tuberías [47]*

	Densidad	Unidades
PP	0,90	g/cm <sup>3</sup>
PE	0,95	
PVC	1,40	
Poliéster	1,95	
Hormigón	2,3	
Fundición	7,05	
Acero	7,85	

**2. Flexibilidad.** Debido a su bajo módulo elástico, permite transportar tuberías en rollos o bobinas de gran longitud, reduciendo de manera importante el número de uniones en el montaje. Además, su alto grado de flexibilidad permite realizar curvaturas en frío sin necesidad de piezas especiales, así como soportar tensiones del terrenos movedizos o baja capacidad portante sin fisurarse.

**3. Resistencia a agentes químicos.** Los polímeros ofrecen mejor resistencia química que los metales, no experimentando nunca corrosión electroquímica. Por este motivo suelen ser los más adecuados en instalaciones que trabajan con reactivos químicos como en las ETAP, así como en terrenos agresivos.

**4. Estabilidad química.** La baja reactividad química de los polímeros implica una menor presencia de incrustaciones en el interior de las tuberías, que como hemos comentado anteriormente, desprende iones al agua y reduce significativamente la sección interior.

Las tuberías de PVC, PE y PP son resistentes a ácidos inorgánicos diluidos, bases y sales metálicas. Sin embargo, sí pueden ser atacados por hidrocarburos clorados y compuestos aromáticos.

**5. Menor golpe de ariete,** definido como aumento repentino de la presión causado por un cambio rápido en la velocidad de caudal de la tubería, por lo que el peligro de sobrepresión y consecuente avería es mucho menor que en el resto de los materiales (ver *Tabla 6*).

**6. Bajo coeficiente de fricción.** La rugosidad interior del tubo determina el coeficiente de fricción del fluido con las paredes de la tubería y consecuentemente las **pérdidas de carga** por rozamiento.

Las superficies interiores de los polímeros destacan por ser muy lisas en comparación con sus competidores, lo que le permite transportar más caudal de agua a igualdad de sección que otras tuberías (ver *Tabla 7*).

Tabla 6. Comparación de la celeridad de onda (a) en distintos materiales utilizados para tuberías. [47]

Material	Espesor (mm)	a (m/s)
Fundición	9	1100
Acero	5	1011
Hormigón	40	1044
PVC-U	24	363
PE	24	214
PE	24	214
PRFV	7	492

Tabla 7. Rugosidad absoluta de distintos materiales empleados en tuberías. [47]

PVC, PE, PP	0,007
PRFV	0,015
Acero	0,09
Fundición	0,15
Hormigón centrifugado	0,25
Hormigón moldeado	0,40
Hormigón en tubería	1,25

**7. Economía y medio ambiente y ahorro energético.** Debido a numerosos factores mencionados anteriormente, la fabricación e instalación de tuberías poliméricas las convierten en una opción económicamente más competitiva. Debido a su ligereza y consecuente fácil manipulación, conseguimos una reducción en los costes de transporte, así como de máquinas o medios auxiliares para su instalación. La producción de tuberías poliméricas requiere menos energía que la producción de tuberías metálicas o de hormigón, debido sobre todo a su proceso de fabricación.

Las tuberías poliméricas son además reciclables, pudiendo recuperar sus residuos y utilizarlos en nuevas tuberías o como materia energía debido a su alto poder calorífico.

Actualmente la investigación en este tipo de materiales está aumentando considerablemente, mejorando tanto los procesos de fabricación como las características de los propios materiales, con el fin de mejorar todas sus propiedades de una manera más eficiente y sostenible mejorando así la vida de los consumidores.

#### 4.9.2. Factores que afectan a la degradación de tuberías poliméricas

La corrosión de tuberías poliméricas se entiende cómo los procesos de **degradación química y física** que pueden sufrir debido a diversos factores como su exposición a productos agresivos, tensiones mecánicas, rayos UV o microorganismos dependiendo del polímero en cuestión. La resistencia a corrosión biológica es mucho mayor en comparación con el resto de las tuberías fabricadas de otros materiales.

La degradación puede manifestarse como **fragilización, agrietamiento, pérdida de propiedades físicas y químicas o rápido envejecimiento** que pueden ocasionar pérdida de funcionalidad en los sistemas.

Además, tienen una **resistencia mecánica reducida** en comparación con los materiales metálicos y el hormigón, por lo que una gran parte de su producción está relacionada a actuar como recubrimiento interior en tuberías de base cemento o metal en sistemas de transición y distribución.

Otros **inconvenientes** que surgen en las instalaciones de estos materiales es su favorecimiento a la formación de **compuestos organolépticos** (alquilfenoles, aldehídos y cetonas) y **biopelículas** en las superficies internas de las tuberías, por lo que controlar el interior de las paredes de las tuberías de agua potable es crítico para garantizar la calidad del agua. [48] [49].

A pesar de no corroerse, las tuberías poliméricas si pueden degradarse con el paso del tiempo (envejecimiento) y lixiviar compuestos al agua que transportan, así como formar biopelícula en su superficie interna.

Las tuberías de **PVC** están constantemente en el punto de mira debido a sus numerosos estudios que certifican su toxicidad. Un informe elaborado por la ECHA (European Chemicals Agency) alerta sobre los problemas para la salud de sus aditivos como los estabilizantes que contienen Cd y Pb, los ftalatos, retardadores de llama o plastificantes, estos últimos prohibidos en la fabricación de tuberías. El problema radica en que estos aditivos no quedan adheridos a la estructura química del PVC, por lo que pueden acabar liberándose al medio, produciendo principalmente problemas en el sistema endocrino y reproductor debido a su incidencia en las hormonas. [50]. Algunas asociaciones como la Oficina Medioambiental Europea (EEB) ha pedido la retirada progresiva de este material para 2030, pretendiendo que siga los pasos del plomo debido a su toxicidad.

Además, su estructura puede verse afectada tras el uso de desinfectantes. La presencia de  $\text{ClO}_2$  disminuye la resistencia a la oxidación de las tuberías, debido a que genera radicales libres que pueden romper la estructura C-C de las cadenas.

Respecto a la utilización de polímeros como recubrimientos internos, las **resinas epoxi** son las más utilizadas debido a que presentan muy buena adherencia a metales y hormigón, estabilidad dimensional, resistencia al agua, una excelente combinación de propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión.

Debido a su capacidad adhesiva, es también utilizada como sistema de unión entre tuberías, reemplazando en muchos casos a las soldaduras.

A pesar de proteger contra la corrosión en tuberías metálicas, la lixiviación del monómero bisfenol A (BPA), compuesto orgánico constituyente de la resina epoxi que según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) presenta riesgo para la salud de los consumidores, está siendo objeto de numerosos estudios debido a la preocupación de numerosas organizaciones sanitarias. [51]

Varios estudios han demostrado su lixiviación al agua potable, presentando mayor cantidad de BFA en tuberías revestidas con la tecnología más antigua LSE (Low Surface Energy) en comparación con la tecnología más reciente DonPro. El riesgo se incrementa en agua caliente y en condiciones estancadas, así como en revestimientos más envejecidos. [51]

## 5. Resultados y discusión del uso de los diferentes tipos de tuberías para agua doméstica.

En el año 2022 en España el 82,3% de las captaciones procedían de agua subterránea (93,8% del volumen total captado), el 14% de agua superficial (6% de volumen total captado) y el 0,1% de agua de lluvia. Esto influye en las composiciones de las incrustaciones de corrosión, ya que las aguas subterráneas producen menos corrosión que las aguas superficiales. Esto se debe a que las primeras están formadas por componentes férricos inestables como  $\gamma$ -FeOOH,  $\beta$ -FeOOH y óxido de hierro amorfo  $Fe_3O_4$ , mientras que las segundas presentan productos de corrosión más gruesos debido a contenidos altos de siderita  $FeCO_3$ , óxido verde y hierro total.

El proceso unitario de tratamiento de agua más frecuente ha sido la desinfección (61,7%), siendo el hipoclorito de sodio el más utilizado (44,4%). Los tratamientos de potabilización son determinantes para el riesgo a corrosión que sufren las tuberías metálicas. Esto se debe a la alta concentración de cloro que presentan, siendo muy perjudiciales especialmente para la corrosión por picadura.

La corrosión en la parte interna de los sistemas de distribución de agua potable estará influenciada por la formación de una capa de óxidos que puede ser o no protectora dependiendo de las circunstancias. La etapa inicial de formación es crítica, ya que, si se forman bajo las condiciones adecuadas, las variaciones adversas posteriores de la calidad del agua y de la propia tubería se verán muy reducidas.

En el caso de **las tuberías de cobre y sus aleaciones**, la corrosión uniforme es poco común, estando influenciada por la formación de la capa protectora interior donde la renovación regular del agua favorece su formación. Los productos de corrosión formados son capas de  $Cu_2O$  roja,  $CuO$  negra y  $Cu_2(OH)_2CO_3$  de color verde sobre estas. Se produce con pH inferiores a 7,5 al verse aumentada la solubilidad de compuestos de cobre en el agua. Inhibidores como ortofosfatos o el uso de filtros decrece la velocidad de corrosión.

La corrosión por picaduras está también influenciada por la formación de capas protectoras y la estabilidad de las pilas de corrosión. En condiciones de estancamiento aumenta especialmente bajo depósitos. Un correcto diseño, instalación de filtro de agua y unión de tubos mediante racores evitan este tipo de corrosión.

Se distinguen Tipo I en agua fría y Tipo II en agua caliente: los productos creados y geometrías son distintos. En agua fría, el aumento de concentración de iones sulfato, nitrato y cloruro aumenta el riesgo, mientras que el bicarbonato lo reduce, siendo la velocidad de corrosión más rápida que en agua caliente, donde está restringida a aguas ácidas, con bajos niveles de bicarbonato y altos en sulfatos y temperatura superior a 30°C. Puede ocurrir corrosión microbiológica a pesar de que no está clara su proliferación.

La descincificación del latón presente en componentes del sistema, puede originar productos de corrosión blancos de  $Zn(OH)_2$ , color rojizo y pérdida de propiedades mecánicas. Se produce en aguas con baja concentración de bicarbonato y alta en iones cloruro, incrementándose el riesgo en agua caliente y en condiciones de estancamiento.

El latón puede sufrir CBT, presentando grietas perpendiculares al esfuerzo de tracción, con contenidos significativos de nitritos o amoníaco en el agua. Esfuerzos críticos en la construcción o montaje o roscas sobre apretadas incrementan su riesgo.

En las **tuberías de fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación**, la corrosión uniforme está asociada con la disolución de iones de hierro (II) al agua, que pueden reaccionar con el oxígeno para formar hidróxidos de hierro menos solubles provocando la turbidez del agua. Si la intensidad de corrosión es baja pueden formarse capas protectoras de  $CaCO_3$  junto con óxidos de hierro hidratados.

La corrosión por picaduras es la más frecuente en estos materiales con velocidades de corrosión altas pudiendo perforar rápidamente las paredes de la instalación. Se desarrollan a partir de pilas galvánicas donde las superficies anódicas se forman en regiones con difícil entrada de oxígeno, mientras que las superficies catódicas son las no cubiertas con libre acceso a este. El riesgo disminuye con el incremento de iones bicarbonato que neutralizan la acidez causada por la hidrólisis de los iones de hierro de la picadura, mientras que aumenta con iones cloro, nitrato y sulfato.

Las tuberías de fundición gris pueden sufrir corrosión gráfitica en sus láminas de grafito, donde son catódicas respecto al hierro, por lo que la matriz ferrita se corroe disolviéndose el hierro. Esta corrosión selectiva se incrementa con el aumento de contenidos de ácido en el agua, así como en condiciones de estancamiento.

La cristalización en forma esferoidal del grafito en la fundición de hierro dúctil le proporciona mejor resistencia a corrosión, mayor ductilidad y propiedades mecánicas en comparación con la fundición gris tradicional, donde el grafito en forma laminada facilita la propagación de grietas.

Las **tuberías de materiales férricos galvanizados** sufren corrosión uniforme solo si la velocidad de corrosión es extremadamente alta, impidiendo la formación de capas de óxido protectoras de  $Zn_5(CO_3)_2$

(OH)<sub>6</sub>. En este caso al no formarse correctamente la capa protectora de cinc, puede producirse ataques no uniformes, picaduras y tubérculos produciendo la reducción del diámetro interior de la tubería.

La estabilidad y formación de esta capa ocurre si la concentración de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> es suficiente. La corrosión aumenta con la velocidad de circulación y con la disminución del pH del agua. Los mismos inhibidores y filtros que en el cobre son eficientes para reducir el riesgo. Al superar los 35 °C el Zn(OH)<sub>2</sub> se transforma en ZnO menos soluble aumentando la protección del sistema.

En el caso de pérdida localizada del recubrimiento, se producen picaduras y tubérculos con reducción del diámetro interior de la tubería, contaminación del agua por productos de corrosión de hierro y perforación de la pared. Se distingue entre el agua fría y la caliente. En la primera se manifiesta en forma de cráteres, mientras que la segunda se produce ampollamiento de la capa debido a la temperatura, favoreciéndose con la acidez del agua. Las picaduras se ven favorecidas en aguas estancadas por la estabilización de los ánodos, donde al circular posteriormente el agua se facilita el transporte de oxígeno.

La relación de concentración (S) de los iones presentes en el agua es crítica para la formación de corrosión:

$$S_1 = \frac{c(\text{Cl}^-) + c(\text{NO}_3^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{HCO}_3^-)} \quad \text{El riesgo aumenta al aumentar } S_1 > 3.$$

La corrosión selectiva producida en agua fría ocasiona el ataque intergranular de la capa de cinc del recubrimiento formando una capa gruesa de productos de corrosión sólidos de cinc y de hierro poco adherentes que se transfieren al agua.

$$S_2 = \frac{c(\text{Cl}^-) + 2c(\text{SO}_4^{2-})}{c(\text{NO}_3^-)} \quad \text{Que el riesgo es bajo si } S_2 < 1 \text{ Y } S_2 > 3.$$

Las **tuberías de acero inoxidable** son las tuberías metálicas más resistentes a la corrosión. Es el material metálico más noble en un sistema de distribución de agua por lo que es improbable su corrosión galvánica. Pueden producirse picaduras si el potencial redox del agua es más positivo que el de iniciación de estas. Los iones cloruro, el incremento de temperatura del agua, las condiciones de estancamiento y la rugosidad de la superficie aumentan el riesgo. En todos los casos, un incremento de cromo, molibdeno y nitrógeno en su composición reduce notablemente el riesgo.

En las tuberías metálicas mencionadas anteriormente, puede producirse corrosión galvánica en instalaciones mixtas con otros materiales con potenciales de corrosión más positivos si la relación de superficie ánodo-cátodo es grande, produciendo la polarización anódica de los materiales con potenciales más negativos. Por lo tanto, un correcto diseño de la instalación evitando el contacto es crítico para evitar este tipo de corrosión.



La corrosión erosión puede ocurrir en los materiales metálicos cuando se supera un grado crítico de turbulencia, especialmente en secciones donde se perturba el caudal. Este efecto puede eliminar la capa protectora presentando corrosión superficial en la dirección de flujo, pudiendo generar una superficie pulida en el interior con el paso del tiempo. El daño se incrementa con el descenso de pH, presencia de partículas sólidas, burbujas de gas y aumento de temperatura.

Las **tuberías de plomo** dejaron de utilizarse por ley debido a la toxicidad de la hidrocercusita, un componente de corrosión cristalina del plomo, por lo que se llevó a cabo una sustitución de todas las tuberías de este material debido al alto riesgo que presentaban para la salud.

Las **tuberías de hormigón armado** siguen siendo una alternativa en condiciones donde se necesiten buenas propiedades mecánicas que soporten características críticas del terreno o elevada presión. El refuerzo en forma de barras o mallas de acero corrugado puede ser susceptible a la corrosión en el caso de filtrarse agentes agresivos presentes en el agua mediante grietas o poros presentes en su superficie. Estos agentes agresivos como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{Cl}^-$  pueden destruir la capa pasiva formada al estar en contacto con el hormigón, produciendo su corrosión, disminuyendo así sus propiedades.

Las **tuberías poliméricas presentan una interesante alternativa a las tuberías** tradicionales debido a que no sufren corrosión electroquímica. Sin embargo, pueden degradarse química y físicamente debido al contacto con productos agresivos, tensiones mecánicas o microorganismos. Su degradación se manifiesta con pérdida de propiedades con el paso del tiempo, agrietamiento o fragilización. Destacan por su baja densidad, flexibilidad, estabilidad química y resistencia a agentes químicos, bajo golpe de ariete y coeficiente de fricción. Este tipo de tuberías son más duraderas en condiciones normales que las metálicas o de hormigón, requiriendo menor mantenimiento y en el caso de tenerlo, que sea mucho más económico debido a su sencilla y rápida manejabilidad y producción.

Además de la elevada resistencia a la corrosión, su ligereza en comparación con los materiales metálicos y hormigón hace posible su mejor transporte e instalación, reduciendo enormemente en los costes globales. Su mayor flexibilidad facilita su instalación en terrenos irregulares o abruptos, así como mayor resistencia a la rotura por movimientos o tensiones del suelo.

## 6. Análisis de fallo de tubería de acero galvanizado después de 30 años en servicio

### 6.1. Antecedentes

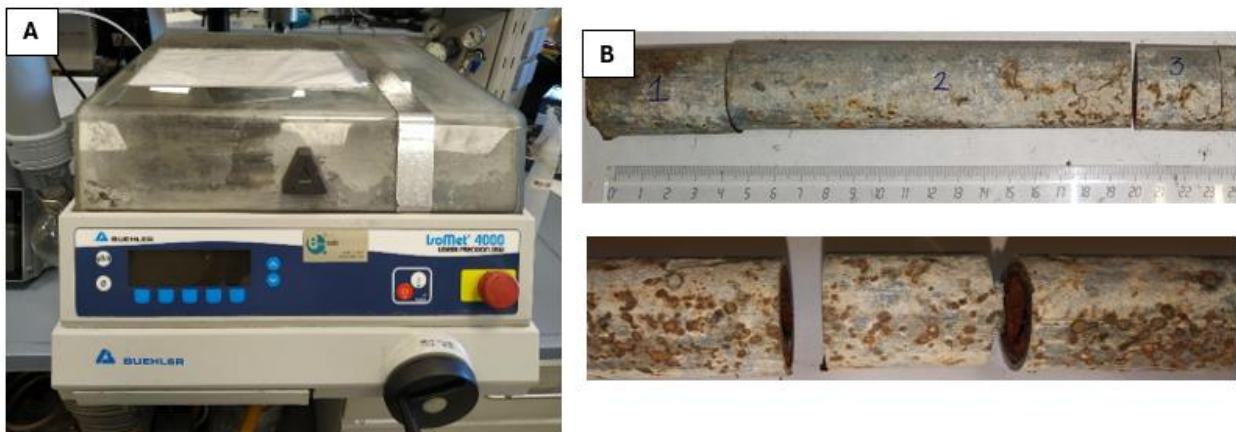
Se ha estudiado el fallo de una tubería doméstica tras 30 años en servicio en la red interior de una vivienda particular en la ciudad de Madrid.

Se detectó una fuga en el piso de la vivienda y se procedió al levantamiento del suelo para examinar la tubería.

## 6.2. Ensayos realizados

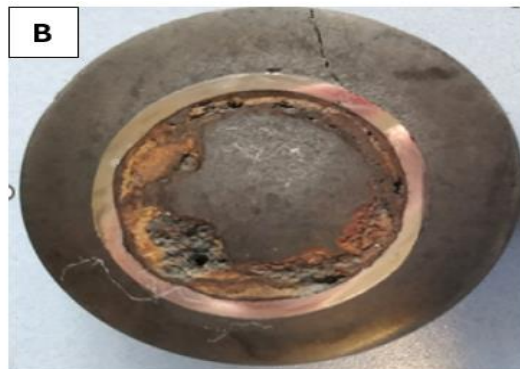
- Corte de las muestras: Cortadora metalográfica Buehler IsoMet 4000. (ver *Ilustración 33.*)
- Examen visual.
- Embutición de las probetas en resina epoxi.
- Pulido de las probetas en la Pulidora Buehler EcoMet 250. (ver *Ilustración 34.*)
- Microscopía óptica: Microscopio óptico Leica. (ver *Ilustración 35. A*)
- Microscopía electrónica de barrido: Microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3400N. (ver *Ilustración 35. B*)
- Difracción de rayos X para analizar los productos de corrosión: Difractómetro X'Pert PRO de Panalytical, con un ánodo de cobre, con un ángulo de barrido ( $2\theta$ ) comprendido entre 10 y 90 °, y el ángulo de paso es de 0.04 °
- Análisis del agua que lleva la tubería. pHmetro y conductímetro.

En el laboratorio, se pudo analizar a simple vista el elevado grado de corrosión que presentaba exteriormente la tubería de 42mm de largo con una sección de 22mm (ver *Ilustración 33-B*). Para analizar mejor el interior, la introdujimos en la cortadora obteniendo 5 secciones de distintos tamaños. (ver *Ilustración 33-A*)



*Ilustración 33. A) Cortadora metalográfica Buehler IsoMet 4000. B) Tubería cortada transversalmente.*

Una vez obtenidas las secciones de la tubería en trozos más pequeños, embutimos dos muestras en resina epoxi donde primero se realizó un desbaste con papeles de SiC de mayor a menor granulometría (120, 240, 600 y 1200, para posteriormente pulirla con el fin de analizarla microscópicamente. (ver *Ilustración 34-A*)



*Ilustración 34.A) Pulidora Buehler EcoMet 250. B) Probeta pulida para análisis metalográfico.*

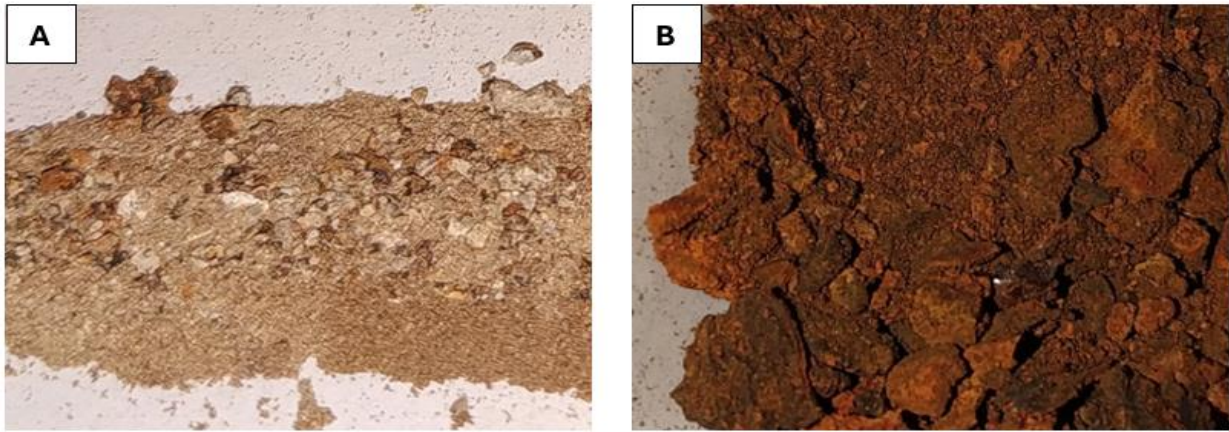
Acto seguido, limpiamos la superficie de la probeta pulida con isopropanol, la secamos con aire caliente y procedimos a analizar su microestructura y tomar imágenes con el microscopio óptico Leica (ver *Ilustración 35-A*)

Una vez obtenidas las imágenes del microscopio óptico, pasamos al microscopio electrónico de barrido (SEM) donde continuamos obteniendo imágenes. (ver *Ilustración 35-B*)



*Ilustración 35. Equipos utilizados para la realización de la parte experimental A) Microscopía óptica: Microscopio óptico Leica. B) Microscopía electrónica de barrido: Microscopio electrónico de barrido Hitachi S-3400N.*

Se tomaron muestras de los productos de corrosión tanto de la parte interna como externa de la tubería con la ayuda de una espátula. Los productos de ambas superficies se analizaron mediante difracción de rayos X (DRX), con el fin de averiguar qué compuestos formaban parte de los mismos (ver *Ilustración 36*).



*Ilustración 36. Productos de corrosión analizados mediante DRX A) Exterior de la tubería B) Interior de la tubería.*

Como parte final del trabajo en el laboratorio, recreamos el proceso de agua estancada en el interior de la tubería durante siete días. Introducimos agua y una sección de la tubería en un recipiente, forrando la parte exterior con un film adherente, estando así sólo el interior de la tubería en contacto con el agua, con el fin de comparar cómo variaba la conductividad y el pH del agua antes y después de fluir por las paredes de la tubería corroída.

### 6.3. Análisis de resultados

#### SEM: MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.

Mediante esta técnica obtuvimos información sobre la topografía y morfología de la sección de la tubería. Mediante EDS obtuvimos información sobre la composición química en distintas áreas de la muestra.

En la *Ilustración 37* se presenta un mapping EDS de una sección transversal de la tubería correspondiente a la zona externa. En este caso se observa la capa de galvanizado, donde diferenciamos perfectamente las tres fases **hierro-cinc-óxido de cinc** en color rojo-verde-azul respectivamente. En el caso del cinc, observamos un color verde más intenso en la zona de contacto con la tubería de acero, cuya intensidad va disminuyendo progresivamente en la zona más externa del recubrimiento, debido a su coexistencia junto con el oxígeno, indicando la oxidación de la capa protectora con su consecuente pérdida de propiedades.

Además, cabe destacar la presencia de silicio y calcio en la capa más externa del recubrimiento oxidado. Como se mencionó anteriormente, esto es debido al contacto que tuvo la tubería enterrada con materiales de construcción como cemento, áridos y ladrillos.

Como estudiamos en el apartado [4.5. Tuberías de materiales férreos galvanizados](#) (*Ilustración 21. Capas de Zn-Fe formadas en el galvanizado*), el recubrimiento galvanizado consta de varias capas (base de acero, gamma, delta, zeta y eta) cuya composición Zn-Fe va variando hasta conseguir una capa final de cinc puro en la parte más externa de la tubería. En el caso de que el recubrimiento se oxide, el cinc reaccionará con

el oxígeno y dejará de ser cinc puro en la parte más externa de la tubería. Ese es el motivo por el que no aparece solo el color verde del cinc en su parte más externa, sino que es ZnO el compuesto predominante, indicando la corrosión del recubrimiento.

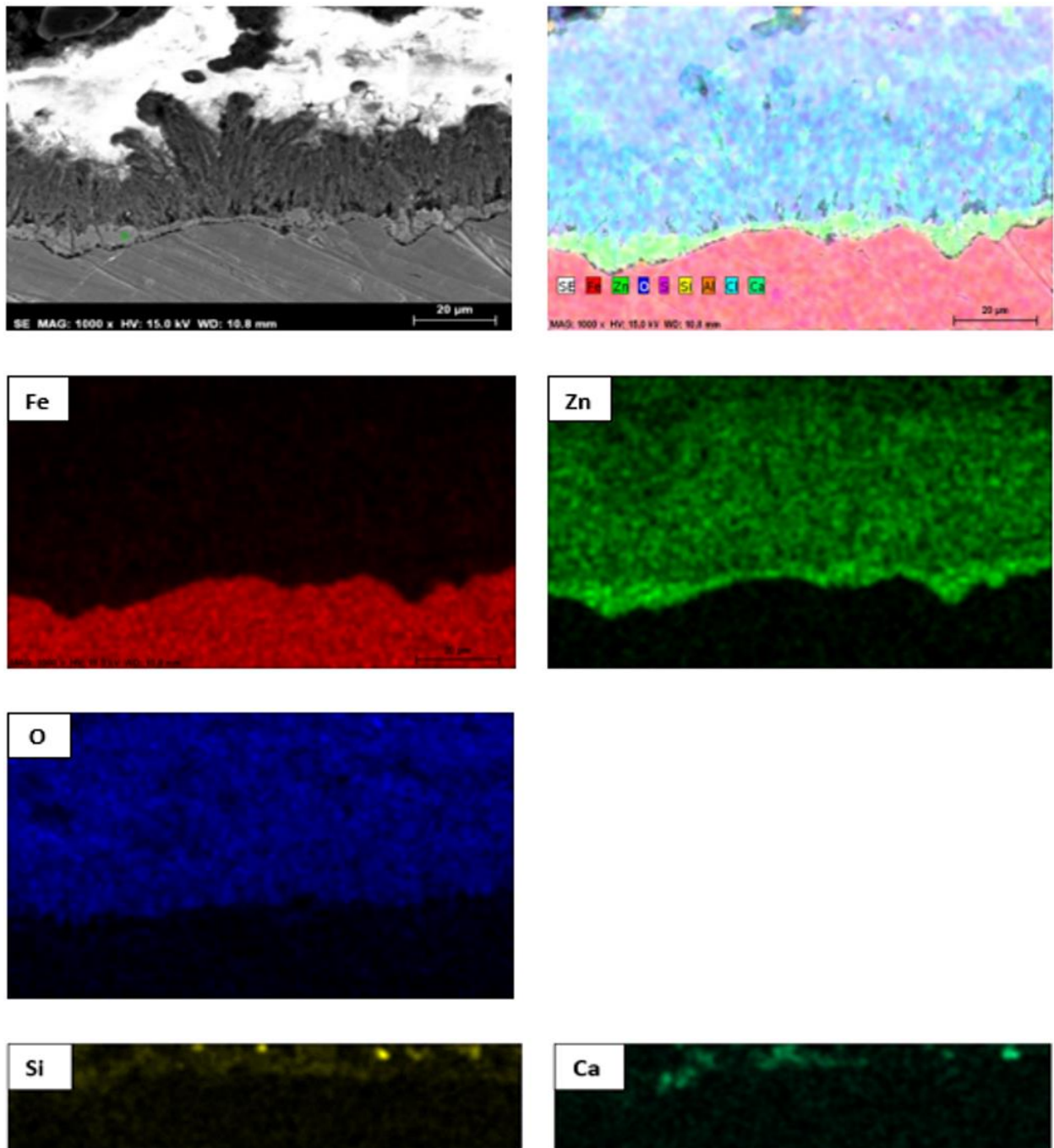
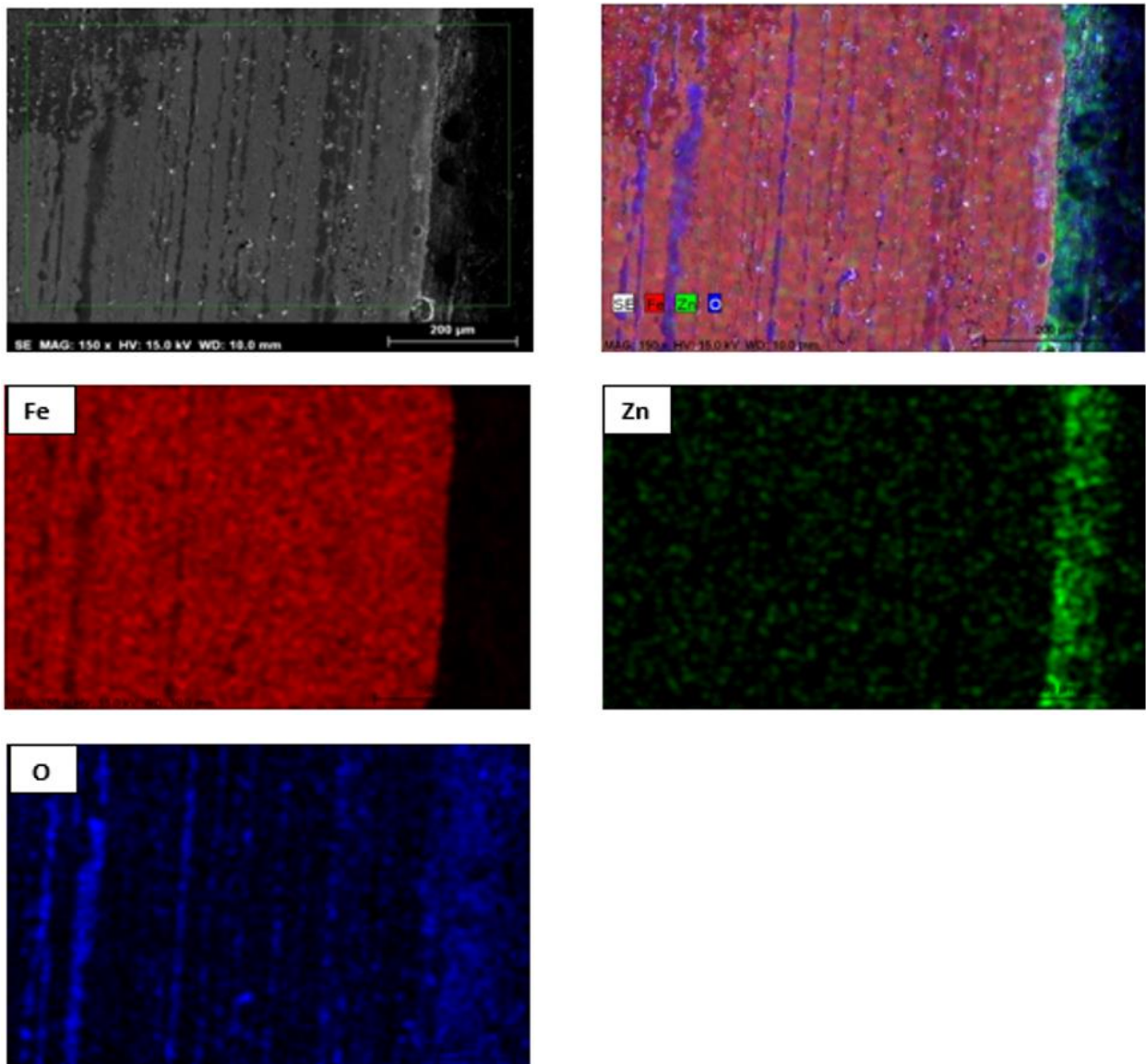


Ilustración 37. Mapping EDS de una sección transversal de la tubería correspondiente a la zona externa. La primera imagen corresponde a la parte externa de la tubería con el recubrimiento galvanizado. Los elementos presentes se distinguen por colores.

En la *Ilustración 38* corroboramos en otra sección distinta del recubrimiento los mismos resultados. Se distinguen perfectamente los límites de **hierro-cinc-óxido de cinc**, coexistiendo de nuevo el cinc y el oxígeno en la misma zona del mapa.

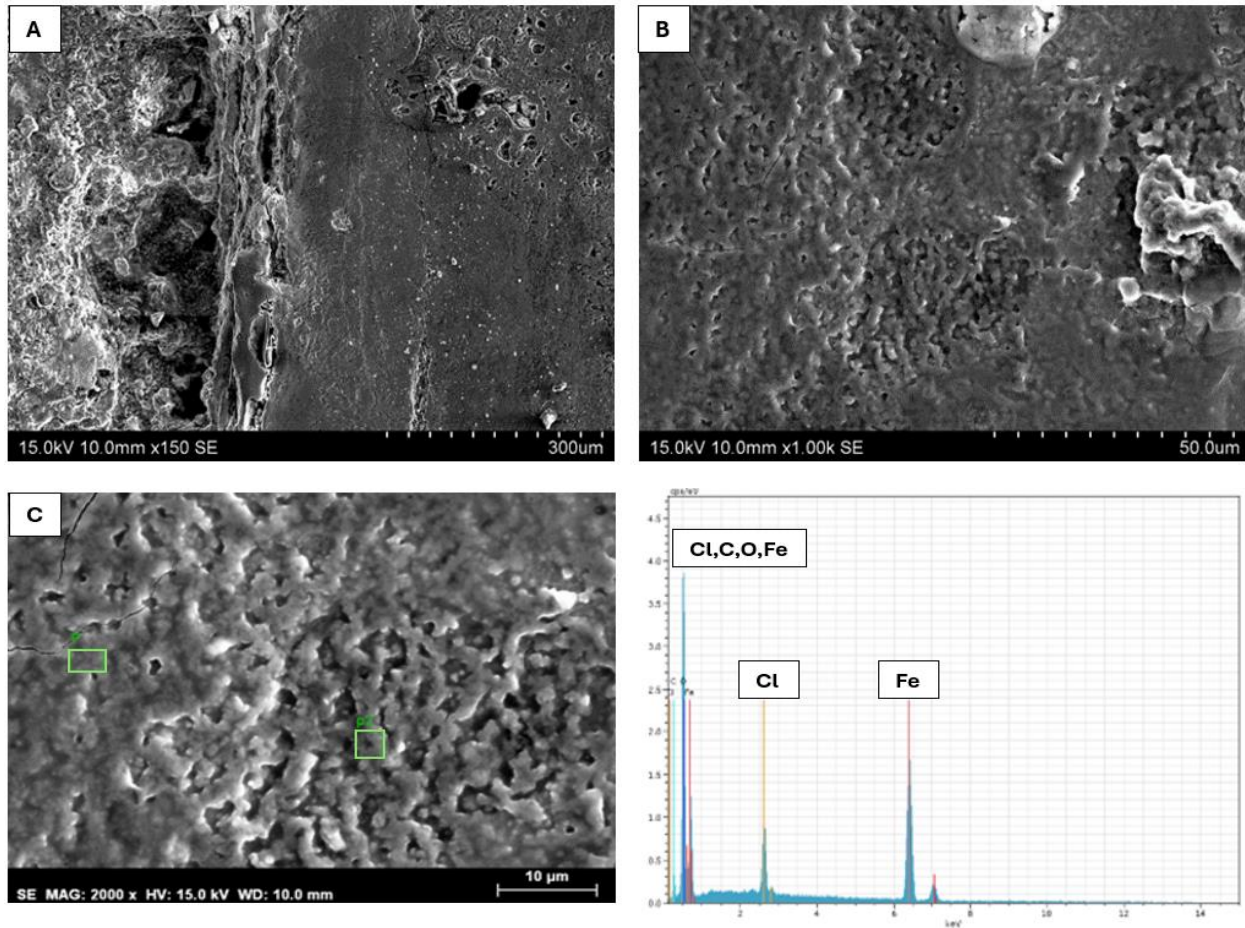


*Ilustración 38. Mapping EDS de otra zona exterior de la tubería con recubrimiento galvanizado. . Los elementos presentes se distinguen por colores.*

En la *ilustración 39*, podemos visualizar a distintos aumentos (x150, x1000, x2000) la morfología y topografía que presenta la sección de la zona interna de la tubería en distintos puntos.

En la *ilustración 39-A)* podemos observar la porosidad presente en los productos oxidados, mostrando cavidades de distintas profundidades. En la *ilustración 39-C)* elegimos dos zonas para determinar su composición elemental, marcadas en cuadros de color verde, una más compacta y la otra con más porosidad. En ambos casos, el análisis EDS fue similar y por ello solamente representamos el de la zona

de la izquierda. Se obtuvo hierro y carbono procedentes de la tubería de acero, oxígeno debido a la oxidación y cloro que, estando presente en la desinfección del agua, terminó apareciendo en los productos de corrosión. Sin embargo, los productos de corrosión interiores no presentan cinc en su composición, ya que después de 30 años se disolvió en el agua, como comentaremos en el siguiente punto.

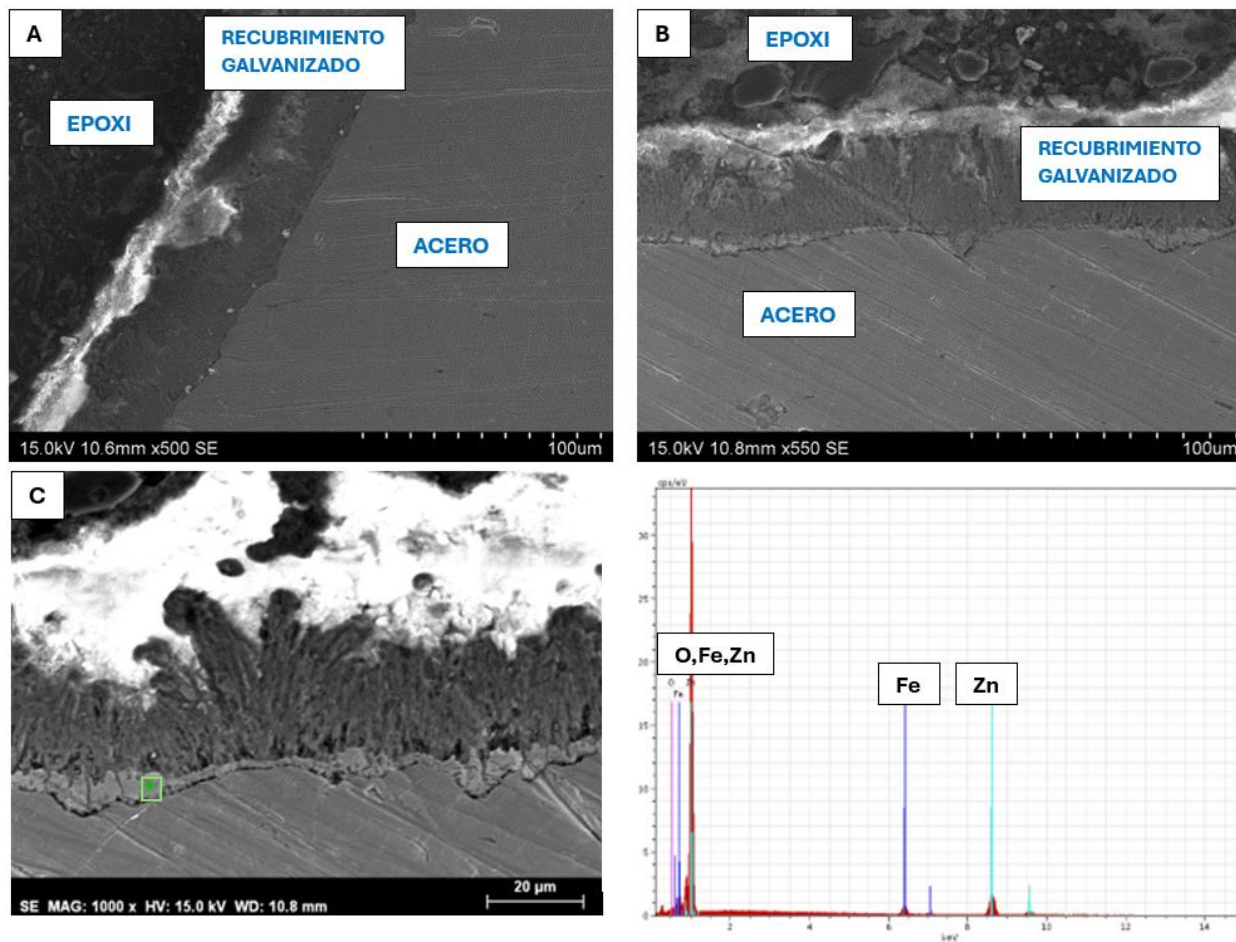


*Ilustración 39. Detalle a distintos aumentos de una zona oxidada del interior de la tubería. A) x500 B) x1000 C) x2000. D) Análisis EDS de las zonas marcadas en verde en la imagen C.*

La capa de productos de corrosión interior, como ya se apreció a simple vista cuando se tomaron las muestras de la tubería, es una capa no protectora presentando porosidad y agrietamiento, como puede observarse en las micrografías de SEM.

Esta capa deja penetrar el agua con el oxígeno además de calcio y/o magnesio presentes en el agua, de manera que sigue produciéndose la corrosión en el interior de la tubería, hasta perforarla como terminó ocurriendo. El hierro actúa como ánodo disolviéndose mientras que el oxígeno se reduce en el cátodo, dando lugar a una reducción de la sección de la tubería y a un engrosamiento de la capa de productos oxidados del interior.

En la *ilustración 40-A)* y *B)* podemos distinguir perfectamente el recubrimiento galvanizado sobre la tubería de acero. En la *ilustración 40-C)* podemos distinguir además la morfología del recubrimiento, distinguiéndose las distintas fases Zn-Fe, pero con la presencia de oxígeno debido a su estado de corrosión. En esta imagen además determinamos su composición elemental del punto verde, obteniendo hierro procedente de la tubería, cinc perteneciente al recubrimiento y oxígeno debido a la corrosión.



*Ilustración 40. Detalle a distintos aumentos de una zona del recubrimiento galvanizado de la tubería. A) x500 B) x550 C) x1000 D) Análisis EDS de las zonas marcadas en verde en la imagen C., correspondiente a una parte del recubrimiento.*

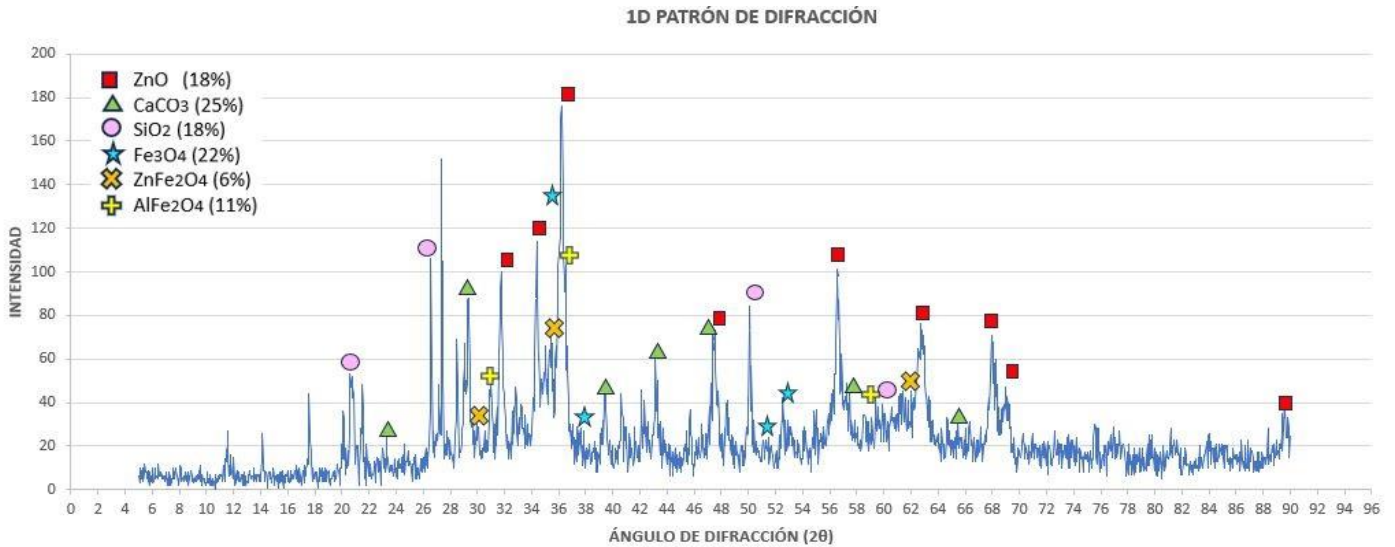
#### -DRX: DIFRACCIÓN RAYOS X

Se realizó DRX en los productos de corrosión presentes en el interior y el exterior de la tubería (mostrados en la *ilustración 36)* con el objetivo de conocer la composición de los óxidos que se formaron.

Una vez obtenidos los diagramas de difracción, se utilizó el software PDF5 para identificar los picos más representativos.



### Exterior de la tubería:



Gráfica 3. Análisis DRX de los productos de corrosión presentes en el exterior de la tubería.

En primer lugar, en el **exterior de la tubería** observamos compuestos de cinc oxidados (**ZnO** y **ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**) (ver *Gráfica 3*), indicando que continuaba presentando productos de este material propios del acero galvanizado, pero en forma oxidada. Por este motivo, su capacidad de protección era muy limitada como se puede observar en la *Ilustración 33–B*)

Debido a su mayoritaria composición de material férreo, observamos gran presencia de óxido de hierro (**Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>**) así como ferrita de aluminio (**AlFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**). Esta espinela inversa no suele ser común en revestimientos galvanizados.

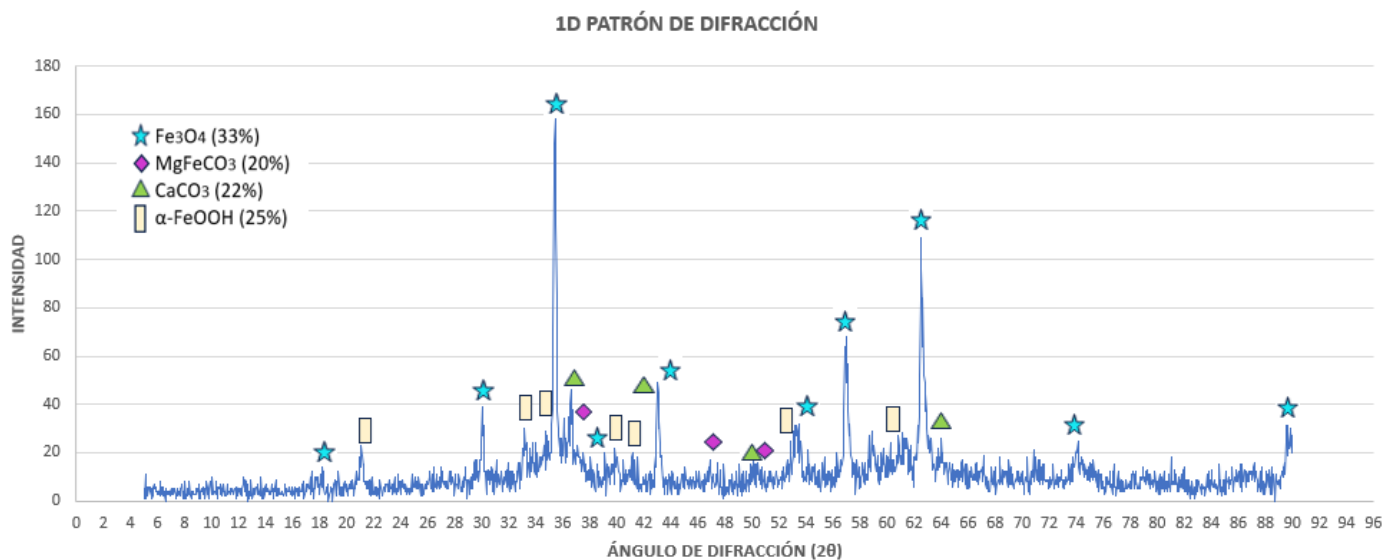
Sin embargo, teniendo en cuenta que la tubería se encontraba enterrada y en contacto con materiales de construcción formados mayoritariamente por **SiO<sub>2</sub>**, **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, **CaO** y **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**, es razonable pensar que una vez corroída la superficie de la tubería eliminándose progresivamente la capa de cinc, parte de estos compuestos interaccionaron con el Fe y el Zn para formar **AlFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>** y **ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>**.

Además, aparecen elevadas cantidades de **SiO<sub>2</sub>** y **CaCO<sub>3</sub>** debido también a los materiales de construcción.



Ilustración 39. Imágenes de la corrosión de la tubería. A) Zona exterior. B) Zona interior.

## Interior de la tubería



Gráfica 4. Análisis DRX de los productos de corrosión presentes en el interior de la tubería

Por otro lado, en el **interior de la tubería** no aparecían compuestos de cinc. Esto puede ser debido a que los productos de óxido de cinc formados en el interior del acero galvanizado son mucho más solubles que los óxidos de hierro o el carbonato cálcico, por lo que tras treinta años en servicio los primeros fueron disueltos por el agua, quedando el interior de la tubería solamente protegida por los últimos, pero sin capas protectoras de cinc.

Como era de esperar tras estudiar la composición de incrustaciones en el apartado [4.4. Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable](#), en los difractogramas de RX obtuvimos fases cristalinas correspondientes a la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), además de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) y  $\text{MgFeCO}_3$  (ver [Gráfica 4](#)). Estos últimos consecuencia del contenido de calcio, magnesio y oxígeno presentes en el agua, y al no ser completamente solubles permanecieron adheridos al interior de la tubería provocando su obstrucción.

Estos compuestos corroboran las composiciones típicas presentes en incrustaciones de corrosión de materiales féreos estudiadas en el apartado [4.4. Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable](#).

Las incrustaciones de corrosión además de provocar la disminución continua de la sección de la tubería y liberación de metales pesados, crea un ambiente propenso a la formación de biopelículas, cuyos ejemplos hemos estudiado en el apartado 4, especialmente entre temperaturas de 20 y 40 °C, donde están presentes bacterias y microorganismos que pueden ser perjudiciales para la salud.

La presencia de estas bacterias pueden acelerar los procesos de corrosión en el interior de la tubería, aunque en este caso práctico no fue posible analizar y verificar su presencia.

## -ANÁLISIS DEL AGUA

El contenido de los cationes y cloruros del agua que había estado en contacto con el interior de la tubería (ver *ilustración 40*) se determinó mediante la técnica de espectroscopía de emisión atómica en plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) en el LABTE de la URJC.

El pH y la conductividad se midieron en el laboratorio.

La *Tabla 8* muestra las características del agua antes y después de estar en contacto con la tubería. Podemos observar que tras estar en contacto siete días con agua procedente del mismo domicilio con la red ya cambiada (Estado 2, CON ÓXIDOS), obtuvimos un elevado aumento de los elementos previamente medidos, especialmente del Fe y Ca.



*Ilustración 40. Agua estancada durante siete días en el interior de la sección de la tubería mostrada en la imagen.*

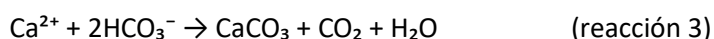
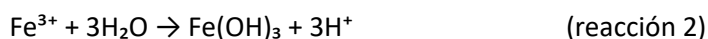
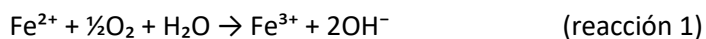
*Tabla 8. Variación en las características del agua antes y después de estar en contacto con la tubería corroída.*

Estado	Fe	Ca	Mg	Cl (mg/kg)	pH	Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
1. SIN ÓXIDOS	<0,04	10,1	1,875	16,39	7,35	132,6
2. CON ÓXIDOS	117	59,6	6,06	-	4,72	2770

En la tabla 8 se observa que la conductividad aumentó exponencialmente debido a la presencia de iones  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  en el agua, multiplicándose a valores extremadamente altos en el caso del hierro y hasta seis veces más en el caso del Mg y Ca.

La acidez del agua aumentó debido a la formación de iones  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$  y  $\text{CO}_2$  hasta un valor muy bajo (pH 4,72) que como hemos estudiado, es óptimo para la formación de corrosión.

A continuación, se indican las reacciones que tienen lugar como consecuencia de los procesos de corrosión en el interior de la tubería y que darán lugar al aumento de la acidez.



La reacción 1 es consecuencia de la reacción anódica de disolución de Fe, procedente de la tubería, y la reacción catódica de reducción del oxígeno. En presencia de agua hay una tendencia a la reacción de hidrólisis del  $\text{Fe}^{3+}$ , que da lugar a productos de corrosión y genera protones que contribuyen a disminuir el pH del medio (reacción 2). De igual manera, la reacción 3 contribuye a la disminución del pH del medio,

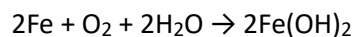
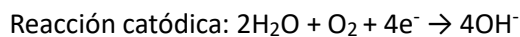
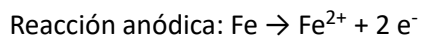
lo que genera un medio ácido más agresivo y favorece que el ataque por corrosión de la tubería siga progresando.

## 6.4. Conclusiones del fallo y posibles soluciones

Después de 30 años en servicio se observa que la tubería analizada presenta un elevado grado de corrosión tanto en la parte externa como en el interior.

El proceso de corrosión que ha tenido lugar es el siguiente:

A temperatura ambiente, el agua con pH neutro y sin oxígeno disuelto no es corrosiva para el hierro o el acero. Sin embargo, cuando el O<sub>2</sub> queda atrapado dentro del sistema de agua, reacciona con la superficie del metal que se disuelve formando óxidos de hierro:



El oxígeno disuelto en el sistema y el tiempo en servicio de la tubería aceleró la corrosión por picadura en su superficie.

Debido a caudales bajos o estancamientos de agua, se pueden formar depósitos, produciéndose mecanismos de aireación diferencial, dando lugar con el paso del tiempo a un ataque severo por picadura.

Como estudiamos en el apartado [4.4. Productos de corrosión de hierro en conducciones de agua potable](#), goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) fueron encontrados en las incrustaciones de nuestro estudio, produciendo productos de corrosión voluminosos causantes de la formación de picaduras que provocaron el fallo del sistema en servicio.

Soluciones: Debido a los problemas de corrosión que presentan las tuberías de acero galvanizado en contacto con agua potable en diversas condiciones, han sido sustituidas por materiales poliméricos que además de no presentar corrosión, presentan mejores propiedades debido a sus características físicas y químicas. Destacan su elevada flexibilidad, fácil transporte, instalación y reparación. Además, presentan un coeficiente de fricción y golpe de ariete muy bajo, y su producción en términos económicos y medioambientales resulta más eficiente.

## 7.Conclusiones

1. La calidad del agua (expresada en características químicas físicas y biológicas) varía de un lugar a otro, viéndose afectada por su origen, el tratamiento al que se somete y el sistema donde se distribuye.

2. Los microorganismos que aparecen en los sistemas de distribución dependen de varios factores como la disponibilidad de nutrientes, la concentración de desinfectante, la temperatura y el pH del agua, la rugosidad interna de la superficie o de capa de corrosión interna.

Su adhesión está influenciada por factores como características de la tubería (rugosidad o tipo de material), parámetros fisicoquímicos del agua (como pH, temperatura, minerales) y características de los propios microorganismos (hidrofobicidad, capacidad de producir sustancia polimérica extracelular o motilidad celular).

3. En el año 2022 en España, el material más frecuente de las redes de distribución era el polietileno de alta densidad (63,1%), seguido del fibrocemento (33%) y de PVC (30,3%). Esto justifica la transición que ha ocurrido en las últimas décadas hacia los materiales poliméricos. Su facilidad de producción, necesidad de menos recursos para su fabricación, su ligereza y facilidad de instalación junto con su bajo riesgo de corrosión y degradación han sido críticos para la elección de este tipo de materiales sobre los metálicos y hormigón.

4. Como desinfectantes destacan los biocidas como el hipoclorito de sodio y el cloro. La utilización de un desinfectante u otro puede influir en la velocidad de corrosión de algunos materiales, formándose iones cloruro que indican en la formación de corrosión por picaduras en materiales metálicos.

5. La capa de productos de corrosión formada en la superficie interior de las tuberías puede ser o no ser protectora dependiendo de las circunstancias. La formación de esta capa es crítica para el comportamiento a corrosión de la tubería, siendo más protectora cuanto más impida los intercambios iónicos y electrónicos entre el metal y el agua, aumentando así la durabilidad del metal.

6. El tipo y velocidad de corrosión de las tuberías metálicas para sistemas de distribución de agua potable se ven afectadas según varios factores: Características del material metálico, del agua, diseño y construcción del sistema, ensayo a presión y puesta en marcha y condiciones de servicio.

7. Respecto a las características del material metálico, su composición química, microestructura y estado superficial influyen en el riesgo a corrosión.

Las características del agua que fluye, como su composición química, su origen, pH y concentración de distintos aniones son de vital importancia para la corrosión. La geometría que presenta la instalación, los sistemas polimetálicos y las uniones pueden producir mecanismos de aireación diferencial aumentando el riesgo. La temperatura es un parámetro muy importante. Por una parte, las variaciones de temperatura

pueden producir diferentes coeficientes de dilatación que afecten a los productos de corrosión y estructura del metal base. Por otra parte, existen tipos de corrosión distintos en función de la temperatura como en el caso del cobre y acero galvanizado.

8. Las tuberías de cobre siguen siendo una la correcta elección debido a su notable resistencia a la corrosión. Sin embargo, hay ciertas condiciones como aguas ácidas y presencia de iones sulfato y cloruro que pueden provocar su corrosión, especialmente mediante picaduras bajo depósitos. La adición de inhibidores como ortofosfatos al agua reduce enormemente el riesgo a corrosión, siendo más común en agua fría que en caliente.

9. En las **fundiciones de hierro y acero** destaca la corrosión por picaduras desarrolladas a partir de pilas galvánicas, dependiendo de las condiciones superficiales de los materiales, características del agua y condiciones de servicio. Las condiciones de estancamiento aumentan el riesgo, así como los iones cloruro, sulfato y nitrato en el agua. Por el contrario, el bicarbonato neutraliza la acidez reduciendo el riesgo.

10. Una vez formadas los productos de corrosión, pueden estabilizarse con el paso del tiempo e inhibir el proceso de corrosión del metal. Sin embargo, es común que se liberen al agua productos de hierro que deterioren su calidad. Se distinguen por su composición si el origen del agua es superficial o subterránea. En el primer caso los productos de corrosión son gruesos y aparecen tubérculos duros, por lo que las tuberías presentan más corrosión que en el segundo caso, donde los productos son delgados y los tubérculos huecos. La siderita **FeCO<sub>3</sub>**, **α-FeOOH** y **γ-FeOOH**, son **inestables y menos protectores**, lo que induce altos niveles de liberación de hierro, mientras que las incrustaciones de corrosión gruesas y compactas con una mayor proporción de **Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>** son **más estable y reduce la liberación** de hierro en el agua.

11. Las tuberías de fundición gris han sido sustituidas por fundición dúctil, gracias a la cristalización del **grafito en forma esferoidal**, le proporciona unas mejores propiedades a la corrosión respecto a la fundición gris donde este aparece en forma de láminas que facilitaban la propagación de grietas.

12. En el caso de la corrosión de **tubería galvanizada**, si la velocidad de corrosión es alta y la concentración de ácido carbónico es baja, se pierde completamente el recubrimiento de cinc produciendo ataque no uniforme, picaduras y tubérculos en el interior de la tubería reduciendo su diámetro. En el caso de pérdida parcial del recubrimiento, también se forman picaduras y tubérculos pudiendo perforar la pared debido a pilas de corrosión inducidas por aireación diferencial. En ambos casos se contamina el agua por productos de corrosión de hierro y metales pesados.

13. En el **acero inoxidable** pueden producirse picaduras si el potencial redox del agua es más positivo que el de iniciación de estas. Los iones cloruro, el incremento de temperatura del agua, las condiciones de estancamiento y la rugosidad de la superficie aumentan el riesgo. En todos los casos, un incremento de

romo, molibdeno y nitrógeno en su composición reduce notablemente el riesgo. En cualquier caso, es el material metálico más resistente a la corrosión en contacto con el agua.

14. El uso de tuberías de plomo se prohibió en la mayoría de los países del mundo debido a su alta toxicidad, debida principalmente a la hidrocerusita  $2\text{PbCO}_3\text{Pb(OH)}_2$  produciendo graves problemas de salud especialmente en los niños.

15. La armadura metálica del hormigón armado puede sufrir corrosión y provocar la pérdida de resistencia que le proporciona a la tubería. Esto se produce por la entrada de iones cloruro y  $\text{CO}_2$  por los poros y grietas de la superficie hasta llegar al material metálico. La formación del óxido nativo de la armadura después de su producción es crítica para actuar como barrera protectora.

16. Las tuberías de fundición **dúctil, acero al carbono u hormigón** conllevan un proceso de fabricación muy costoso además de un peso muy elevado que dificultan su transporte e instalación. Por ello las **tuberías poliméricas** están sustituyendo a estos materiales más tradicionales debido a su ligereza, facilidad de producción, transporte e instalación, así como resistencia a la corrosión y bajo mantenimiento.

Las tuberías de hormigón y materiales metálicos tradicionales son seleccionadas en situaciones donde la resistencia mecánica o condiciones del terreno sean críticas.

17. Contaminantes. Todos los materiales utilizados en tubería de distribución de agua potable desprenden contaminantes al agua en conducción.

Los materiales metálicos pueden transmitir iones de metales pesados como Mn, Pb, V, Cu, Zn, Cr y Cd presentes en su composición en los productos de corrosión.

Por su parte, los materiales poliméricos también pueden liberar compuestos al agua en contacto. El PE puede liberar compuestos organolépticos como alquilfenoles, aldehídos o cetonas especialmente en las primeras semanas de uso, por lo que hay que tenerlo muy en cuenta a la hora de consumir el agua. El PEX desprende MTBE especialmente en los primeros meses de funcionamiento. El PVC es el más investigado debido a numerosos estudios que certifican la toxicidad de sus aditivos, como estabilizantes, plastificantes o retardadores de llama.

## 8. Bibliografía

[1]. Stefan DS, Bosomoiu M, Teodorescu G. "The behavior of polymeric pipes in drinking water distribution System— Comparison with other pipe materials." *Polymers*. 2023;15(19):3872. doi: 10.3390/polym15193872.

[2]. Tuovinen OH, Button KS, Vuorinen A, Carlson L, Mair DM, Yut LA. "Bacterial, chemical, and mineralogical characteristics of tubercles in distribution pipelines." *J AM WATER WORKS ASS*. 1980;72(11):626-635. doi: 10.1002/j.1551-8833.1980.tb04599.x

- [3] BigRentz. Think Big Block: (2023): The History of Plumbing around the world. Disponible en: <https://www.bigrentz.com/blog/very-not-boring-history-plumbing> [Consulta: 8 de diciembre de 2023]
- [4] PAM Saint-Gobain. (2017): Tubería de Fundición a través de la historia. Disponible en: <https://www.pamline.es/tuberia-fundicion-traves-historia> [Consulta: 10 de enero de 2024]
- [5] Leonellha Barreto. (n.d.). Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox. Disponible en: <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/acerca-de-esta-herramienta/%C2%BFsabes-qu%C3%A9-son-los-sistemas-de-abastecimiento-de-agua%3F> [Consulta: 12 de enero de 2024]
- [6] Ministerio de Sanidad (2022). Calidad del agua de consumo en España. Secretaría General Técnica Centro de Publicaciones. Catálogo general de publicaciones oficiales. Paseo del Prado, 18, 28014 Madrid [Consulta: 13 de enero de 2024]
- Disponible en: [https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/calidadAguas/pfd/Informe\\_2022.pdf](https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/calidadAguas/pfd/Informe_2022.pdf) [Consulta: 12 de enero de 2024]
- [7] ACCIONA.(2020) Potabilización del agua. Copyright © - ACCIONA
- Disponible en: [https://www.accionacom.es/tratamiento-de-agua/potabilizacion/?\\_adin=02021864894](https://www.accionacom.es/tratamiento-de-agua/potabilizacion/?_adin=02021864894) [Consulta: 13 de enero de 2024]
- [8].LibreTexts. Sistemas y Operaciones de Distribución de Agua. College of the Canyons (ZTC Textbooks). Disponible en: [https://espanol.libretexts.org/Vocacional/Tecnolog%C3%ADa\\_de\\_Sistemas\\_de\\_Agua/Water\\_120%3A\\_Introducci%C3%B3n\\_a\\_la\\_Tecnolog%C3%ADa\\_de\\_Sistemas\\_de\\_Agua/01%3A\\_Cap%C3%ADtulos/1.06%3A\\_Sistemas\\_y\\_Operaciones\\_de\\_Distribuci%C3%B3n\\_de\\_Agua](https://espanol.libretexts.org/Vocacional/Tecnolog%C3%ADa_de_Sistemas_de_Agua/Water_120%3A_Introducci%C3%B3n_a_la_Tecnolog%C3%ADa_de_Sistemas_de_Agua/01%3A_Cap%C3%ADtulos/1.06%3A_Sistemas_y_Operaciones_de_Distribuci%C3%B3n_de_Agua) [Consulta: 14 de enero de 2024]
- [9] AENOR. (2005) UNE-EN 12502-1:2005. Protección de materiales metálicos contra la corrosión - Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua. Parte 1: Generalidades. Asociación Española de Normalización.
- [10] Copper Development Association Inc. (n.d.). Water Service Lines. Why Copper. Disponible en: [https://www.copper.org/applications/plumbing/water\\_service/why\\_copper.html](https://www.copper.org/applications/plumbing/water_service/why_copper.html) [Consulta: 26 de enero de 2024]
- [11] AENOR.(2005) UNE-EN 12502-2:2005. Protección de materiales metálicos contra la corrosión - Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua AENOR. Parte 2: Factores que influyen para el cobre y aleaciones de cobre. Asociación Española de Normalización.
- [12] REAL DECRETO 3/2023. Por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. Boletín Oficial del Estado, 2023.
- [13] Dr. Steve Reiber. HDR Engineering. (2013). *Corrosion assessment of copper tubing from residences in the Cobb County - Marietta Water Authority (CCMWA) service area* (Technical Memorandum). CCMWA.
- [14] Lytle, D. A., & Nadagouda, M. N. (2010). A comprehensive investigation of copper pitting corrosion in a drinking water distribution system. *Corrosion Science*, 52(6), 1927-1938.
- [15] [Jia, Z., Du, C., Zhang, D., & Li, X. (2011). Analysis of copper pitting failure in drinking water distribution system. *Journal of failure analysis and prevention*, 11, 152-157.].
- [16] Tzevelekou, T., Flampouri, A., Rikos, A., Vazdirvanidis, A., Pantazopoulos, G., & Skarmoutsos, D. (2013). Hot-water corrosion failure of a hard-drawn copper tube. *Engineering Failure Analysis*, 33, 176-183.
- [17] Burleigh, T. D., Gierke, C. G., Fredj, N., & Boston, P. J. (2014). Copper tube pitting in Santa Fe municipal water caused by microbial induced corrosion. *Materials*, 7(6), 4321-4334.



- [18] Zhang, Y., & Edwards, M. (2011). Effects of pH, chloride, bicarbonate, and phosphate on brass dezincification. *Journal-American Water Works Association*, 103(4), 90-102.
- [19] Saint-Gobain PAM. (n.d.). Características de la fundición dúctil.  
Disponible en: [https://www.pamline.es/informacion-tecnica/fabricacion-y-calidad/caracteristicas-fundicion-ductil#:~:text=%C3%89ste%20se%20solidifica%20en%20forma,perlita%20\(Fe%CE%B1%20%2B%20Fe3C\).](https://www.pamline.es/informacion-tecnica/fabricacion-y-calidad/caracteristicas-fundicion-ductil#:~:text=%C3%89ste%20se%20solidifica%20en%20forma,perlita%20(Fe%CE%B1%20%2B%20Fe3C).)  
[Consulta: 16 de marzo de 2024]
- [20] AENOR (2005). UNE-EN 12502-5:2005. Protección de materiales metálicos contra la corrosión - Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua AENOR. Parte 5: Factores que influyen para fundición de hierro, acero no aleado y de baja aleación. Asociación Española de Normalización.
- [21] Subramanian, C. (2018). Localized pitting corrosion of API 5L grade A pipe used in industrial fire water piping applications. *Engineering Failure Analysis*, 92, 405-417.
- [22] Starosvetsky, D., Armon, R., Yahalom, J., & Starosvetsky, J. (2001). Pitting corrosion of carbon steel caused by iron bacteria. *International biodeterioration & biodegradation*, 47(2), 79-87.
- [23] Jur, T. A., Middleton Jr, J. I., Yurko III, A. A., Windham, R. L., & Grey Jr, J. R. (2021). Case studies in graphitic corrosion of cast iron pipe. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 21(2), 376-386.
- [24] Wang, W., Shi, W., & Li, C. Q. (2019). Time dependent reliability analysis for cast iron pipes subjected to pitting corrosion. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 175, 103935.
- [25] Zhang H, Liu D, Zhao L, et al. Review on corrosion and corrosion scale formation upon unlined cast iron pipes in drinking water distribution systems. *J ENVIRON SCI*. 2022;117:173-189. doi: 10.1016/j.jes.2022.04.024.
- [26] Yang F, Shi B, Gu J, Wang D, Yang M. Morphological and physicochemical characteristics of iron corrosion scales formed under different water source histories in a drinking water distribution system. *Water Res*. 2012;46(16):5423-5433. doi: 10.1016/j.watres.2012.07.031.
- [27] American Galvanizers Association. (n.d.). The HDG Coating.  
Disponible en: <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/what-is-galvanizing/the-hd> [Consulta: 3 de febrero de 2024]
- [28] Pawlowski, B., Krawczyk, J., & Bala, P. (2013). The premature deterioration of zinc-coated steel pipes in water distribution system. *Inter. J. Mater. Mech. Eng*, 2, 43-47.
- [29] AENOR.(2005) UNE-EN 12502-3:2005. Protección de materiales metálicos contra la corrosión - Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua AENOR. Parte 3: Factores que influyen para materiales férreos galvanizados en caliente. Asociación Española de Normalización.
- [30] Pawlowski, B., Krawczyk, J., & Bala, P. (2013). The premature deterioration of zinc-coated steel pipes in water distribution system. *Inter. J. Mater. Mech. Eng*, 2, 43-47.]
- [31]Nielsen, K., & Yding, F. (1983). Influence of pipe quality on corrosion of galvanized steel pipes for domestic water supply. *Materials and Corrosion*, 34(11), 547-556.
- [32] Živković, Dražen & Mišina, Nedjeljko & Ljumović, Petar. (2017). Corrosion Damage Of Seam Welded Galvanized Hot Water Pipelines. *Tehnički Vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku* 1330-3651. 24. 1007-1012. 10.17559/TV-20170112142442.
- [33] AENOR. (2010) UNE-EN 10312:2010. Tubos de acero inoxidable soldados para la conducción de líquidos acuosos incluyendo el agua destinada al consumo humano. Condiciones técnicas de suministro. Asociación Española de Normalización.

- [34] Martins, C. M. B., Moreira, J. L., & Martins, J. I. (2014). Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Engineering Failure Analysis*, 39, 65-71.
- [35] AENOR (2005). UNE-EN 12502-4:2005. Protección de materiales metálicos contra la corrosión - Recomendaciones para la evaluación del riesgo de corrosión en sistemas de distribución y almacenamiento de agua AENOR. Parte 4: Factores que influyen para el acero inoxidable. Asociación Española de Normalización.
- [36] ASTDR Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Division of Toxicology and Human Health Sciences (2023). ATSDR's Substance Priority List. Atlanta.
- Disponible en: <https://www.atsdr.cdc.gov/spl/> [Consulta: 6 de abril de 2024]
- [37] Real Decreto 140/2003. Por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. BOE-A-2003-3596.
- [38]. Xie Y, Giammar DE. Effects of flow and water chemistry on lead release rates from pipe scales. *Water Res.* 2011;45(19):6525-6534. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004313541100580X>. doi: 10.1016/j.watres.2011.09.050.
- [39] Clark, B. N., Masters, S. V., & Edwards, M. A. (2015). Lead release to drinking water from galvanized steel pipe coatings. *Environmental Engineering Science*, 32(8), 713-721.
- [40] Nguyen, Q. D., & Castel, A. (2023). Long-term durability of underground reinforced concrete pipes in natural chloride and carbonation environments. *Construction and Building Materials*, 394, 132230.
- [41] Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269, 121240.
- [42] Abd El Haleem, S. M., Abd El Aal, E. E., Abd El Wanees, S., & Diab, A. (2010). Environmental factors affecting the corrosion behaviour of reinforcing steel: I. The early stage of passive film formation in Ca (OH) 2 solutions. *Corrosion Science*, 52(12), 3875-3882.
- [43] Angst, U. M., Geiker, M. R., Michel, A., Gehlen, C., Wong, H., Isgor, O. B., ... & Buenfeld, N. (2017). The steel-concrete interface. *Materials and Structures*, 50, 1-24.
- [44] Młyńska, A., & Zielina, M. (2017). The influence of prefabricated pipe cement coatings and those made during pipe renovation on drinking water quality. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 17, p. 00061). EDP Sciences.
- [45] Mager, S., Knopick, M., & Oddy, G. (2022). The concentration and prevalence of asbestos fibres in Christchurch, New Zealand's drinking water supply. *Water Supply*, 22(4), 4445-4456.
- [46] Zavašnik, J., Šestan, A., & Škapin, S. (2022). Degradation of asbestos-Reinforced water supply cement pipes after a long-term operation. *Chemosphere*, 287, 131977.
- [47] D.Luís Balairón Pérez. (2009) Guía Técnica. Las tuberías plásticas en las obras hidráulicas. Asociación Española de Fabricantes de Tubos y Accesorios Plásticos. (AseTub).
- Disponible en: [https://ingemecanica.com/utilidades/objetos/tuberias/guia\\_tecnica.pdf](https://ingemecanica.com/utilidades/objetos/tuberias/guia_tecnica.pdf) [Consulta: 2 de mayo de 2024]
- [48] Skjevraak, I., Due, A., Gjerstad, K. O., & Herikstad, H. (2003). Volatile organic components migrating from plastic pipes (HDPE, PEX and PVC) into drinking water. *Water research*, 37(8), 1912-1920.
- [49] Trusz, A., Gorlach, J., Gazda, D., & Piekarska, K. (2024). Biofilm formation in the drinking water distribution system, on selected pipe materials in flow reactors—preliminary investigations. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 24(3), 535-542.
- [50] ECHA European Chemicals Agency. (2023) Investigation report on PVC and PVC additives. Version Number: 1.0 (Final)

Disponible en: [https://echa.europa.eu/documents/10162/17233/rest\\_pvc\\_investigation\\_report\\_en.pdf/98134bd2-f26e-fa4f-8ae1-004d2a3a29b6?t=1701157368019](https://echa.europa.eu/documents/10162/17233/rest_pvc_investigation_report_en.pdf/98134bd2-f26e-fa4f-8ae1-004d2a3a29b6?t=1701157368019) [Consulta: 18 de mayo de 2024]

[51] Rajasärkkä J, Pernica M, Kuta J, Lašňák J, Šimek Z, Bláha L. Drinking water contaminants from epoxy resin-coated pipes: A field study. *Water Res.* 2016;103:133-140. doi: 10.1016/j.watres.2016.07.027.