

02-018

Optimization of warranties based on the wear of buried metallic structures

Francisco Ortega Fernández; Lorena De Arriba; Joaquín Villanueva Balsera; Fernando Rodríguez

Universidad de Oviedo;

All around the world there are millions of tons of metal structures partially or completely buried under the ground. Examples of this type of elements are pipes but also the lower part of metallic structures.

The major concern related to the useful life of metal structures is corrosion. This factor is essential in the design phase because it has relevant implications on resistance and economic calculation.

At present, studies in this field have focused on two methodologies: qualitative and quantitative. The qualitative methods establish an orientation of the level of corrosive load that the soil has and, therefore, they have little practical application in the design of structures. On the other hand, quantitative methods allow the assignment of numerical values to the expected corrosion.

The purpose of this study is the evaluation of existing models of corrosion in the projects of buried metallic structures according to the environment in order to decide the protection needed in order to fulfill the warranties during its life cycle.

Keywords: Corrosion; Metallic structures; Construction

Optimización de garantías en función de la vida útil de las estructuras metálicas enterradas

Hoy en día, en todo el mundo existen millones de toneladas de estructuras metálicas total o parcialmente enterradas en el suelo. Ejemplos de este tipo de elementos son las tuberías que transportan petróleo, gas o agua pero también los componentes estructurales inferiores.

La principal preocupación relacionada con la vida útil de estas estructuras es la corrosión, factor esencial en la fase de diseño porque tiene implicaciones relevantes sobre resistencia y cálculo económico. Desafortunadamente, los largos periodos de garantía exigidos hacen muy compleja su determinación.

Los estudios en este campo se han centrado en dos metodologías: cualitativas y cuantitativas. Los métodos cualitativos establecen una orientación del nivel de carga corrosiva que tiene el suelo y, por lo tanto, tienen poca aplicación práctica en el diseño de estructuras. Por otro lado, los métodos cuantitativos permiten la asignación de valores numéricos a la corrosión esperada.

El propósito de este trabajo es la valoración de los modelos de corrosión utilizables en proyectos de estructuras metálicas enterradas en función de las características del entorno. El estudio evalúa los métodos existentes y determina los más adecuados para la estimación cuantitativa de la tasa de corrosión, herramienta esencial para decidir las dimensiones de la estructura que garanticen su vida útil.

Palabras clave: Corrosión; estructuras metálicas; construcción metálica

Correspondencia: Francisco Ortega fran@api.uniovi.es



Este obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

1. Introducción

Los proyectos de ingeniería requieren en muchas ocasiones de la utilización de estructuras metálicas enterradas parcial o totalmente en el suelo. Como consecuencia, alrededor del mundo hay millones de toneladas de estructuras metálicas soterradas. Ejemplos de este tipo de estructuras son tanques, elementos estructurales para soportar otros componentes o tuberías que cruzan los países transportando gas natural y líquidos peligrosos de fuentes, por ejemplo, pozos, puertos o refinerías a clientes. La mayor parte de la energía total consumida en los países desarrollados pasa por un oleoducto en algún punto entre su fuente original y el punto final de consumo.

La principal preocupación relacionada con la vida útil de este tipo de estructuras es la corrosión. Este factor es esencial en la fase de diseño de las mismas, no solo por sus implicaciones en la resistencia estructural si no por su importancia en el cálculo económico. La exactitud en el dimensionamiento permite ajustar las tolerancias y, en consecuencia, generar ofertas más económicas cumpliendo las garantías exigidas y, por lo tanto, con mayor probabilidad de éxito.

Inicialmente, se estudió la corrosión en metales expuestos a condiciones atmosféricas. Sin embargo, en todo el mundo hay millones de estructuras metálicas enterradas, por lo que es necesario estudiar el efecto de la corrosión en estas condiciones. En general, los enfoques utilizados para dimensionar estos elementos se basan en valores medios muy conservadores obtenidos de la experiencia o pruebas de larga duración. Aunque es bien sabido que las condiciones y la composición del suelo afectan a la gravedad de la corrosión, en muchos casos se usan los mismos espesores o revestimientos de metal base, independientemente de cuáles sean las características particulares del sitio donde se va a enterrar la estructura o se utilizarán valores tabulados resultantes de la bibliografía existente.

No existe una metodología específica establecida para el diseño de estructuras metálicas que determine claramente los valores que deben utilizarse. En consecuencia, la decisión es muy subjetiva y altamente dependiente de la experiencia del ingeniero de diseño. Además, la escasez de datos existentes y su fiabilidad cuestionable, dan lugar a un sobredimensionamiento durante el planteamiento del diseño realmente alto, lo que produce un uso ineficiente de los materiales. Por otro lado, la falta de herramientas de apoyo a la toma de decisiones durante esta fase del proyecto, puede conducir a un fallo de la estructura en entornos particularmente agresivos antes de completar su vida útil, al haberse estimado su resistencia a la corrosión muy optimista.

Teniendo en cuenta lo anterior y de acuerdo a los principios de la ingeniería sostenible, resulta evidente que para avanzar en la mejora de la eficiencia en la utilización de los materiales y de la optimización de las garantías en función de la vida útil de este tipo de estructuras, es necesario desarrollar un análisis de los métodos que valoran la corrosión y que se emplean en la fase de diseño de los proyectos de estructuras metálicas enterradas en función de las características del entorno.

2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio, se fundamenta en la evaluación de los métodos existentes para la estimación de la corrosión que afecta, de manera severa, a las estructuras metálicas enterradas en función de las características del entorno donde van a ser situadas.

Para lograr el objetivo planteado, se requiere la realización de un análisis centrado en la corrosión como problemática principal dentro del diseño de las estructuras metálicas

enterradas, tanto la derivada de los propios metales de las estructuras a estudio, como el producido por el ambiente al que están sometidas, en este caso, el suelo.

Conocido el factor crítico en la definición de las estructuras metálicas, se recorrerán los métodos empleados en el cálculo de su dimensionamiento. El análisis se fundamenta en la claridad y fiabilidad que presentan las distintas metodologías a la hora de estimar la corrosión y su validez como ayuda para el diseño de estructuras óptimas.

Como resultado de la valoración de los métodos empleados, se busca determinar la metodología más adecuada para la estimación de la tasa de corrosión y por lo tanto lograr la optimización de las garantías de las estructuras metálicas enterradas en función de su vida útil.

3. Corrosión en estructuras metálicas

La corrosión se define como la degradación de un material o de sus propiedades debido a su reacción con el ambiente en el que está inmerso. Es una destrucción gradual que normalmente afecta a los metales, y que se produce por una reacción química o electroquímica con el ambiente (Alter, & Mestres, 2004).

La degradación que se produce debida a la corrosión, es la causa general de la alteración y destrucción de una gran parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre. Se estima que aproximadamente el 25% de la producción anual de acero es destruida por la corrosión. Las estructuras como el gas natural, los oleoductos y las tuberías de agua son sólo algunas de las muchas estructuras que se han visto afectadas por la corrosión en el suelo en todo el mundo a lo largo de los tiempos (Schaschl, & Marsh, 1963), (Starkey & Wight, 1945), (Levlin, 1993).

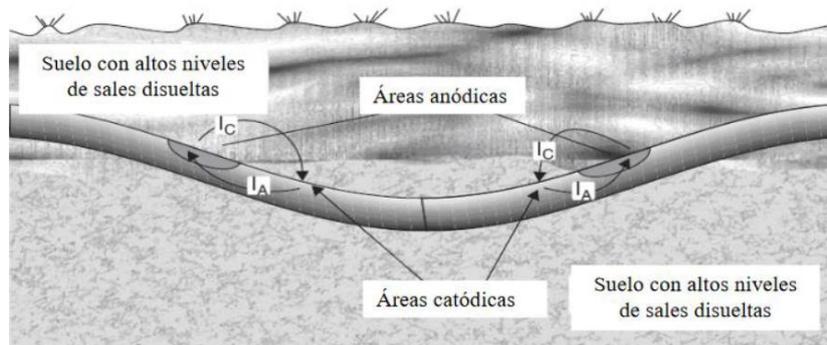
En la atmósfera, la mayoría de los materiales tienen modos predecibles de comportamiento, respecto a la corrosión, que son altamente dependientes de los niveles de contaminación, humedad relativa y temperatura. Una vez identificados estos parámetros básicos, el mecanismo de corrosión del metal será común a todos los productos en zonas climáticas similares. Por el contrario, en el caso de las estructuras metálicas enterradas, la situación es muy diferente porque existe una enorme variabilidad en las condiciones locales cuyas características tienen un efecto significativo sobre cómo se comporta el acero en cada tipo de suelo.

3.1 Corrosión en el acero enterrado

La corrosión de las estructuras enterradas de acero se produce cuando se generan células de concentración. Este proceso tiene lugar cuando una estructura está en contacto con suelos de diferentes características o por diferencias en el material. Como se muestra en la figura 1, la corriente fluye a través de la tierra desde el área anódica al área catódica y a través del tubo de acero del área catódica de nuevo se desplaza al área anódica para completar el circuito (Roberge, 2008).

En la mayoría de los casos, la porción de estructura que está en el suelo más conductivo actúa como un ánodo y la parte situada en el suelo con baja conductividad actúa como cátodo. El mismo suelo actúa como un electrolito y la estructura es el contacto metálico que es necesario para que se genere una célula de corrosión. La corrosión ocurre en el lugar donde la corriente es descargada del metal al suelo en las áreas anódicas. En las zonas catódicas, el flujo de corriente va desde el suelo hasta la estructura metálica, manteniendo la construcción protegida.

Figura 1: Mecanismo de corrosión en una estructura de acero



En el área anódica de la estructura sucede la reacción anódica y produce la pérdida de iones metálicos, es decir, la corrosión del metal. En el área del cátodo ocurre la reacción catódica o reacción de reducción.

3.2 Corrosión en los suelos

El suelo es un ambiente corrosivo muy complejo y, por lo tanto, la corrosión de los metales en este medio es extremadamente variable. El motivo de dicha inestabilidad se fundamenta en que el ambiente subterráneo está cambiando constantemente, no hay dos suelos iguales, incluso cuando están geográficamente cerca.

La mayoría de los procesos destructivos que afectan a los metales enterrados son de naturaleza electroquímica, principalmente asociados con las características de los suelos donde se sitúan (Osella, Favetto, & López, 1998). El electrolito o incluso sólo una fina película de humedad adsorbida, es suficiente para que la corrosión se origine desde el punto de vista de su mecanismo electroquímico (Yan et al., 2014).

Los principales factores que influyen en la corrosión de las estructuras enterradas son las siguientes:

- Textura de la tierra

Consiste en la distribución de tamaño de las partículas minerales que forman el suelo. El terreno se compone de arcillas (diámetros inferiores a 0,002 mm), limos (diámetros entre 0,002 y 0,5 mm) y finalmente las arenas son las partículas más grandes (diámetros superiores a 0,05). Dependiendo de los valores tomados por los porcentajes de arena, arcilla y limo, se define la clasificación del suelo (Burstein, Shreir, & Jarman, 1994).

Las partículas más finas del suelo se consideran el medio corrosivo peor para las estructuras enterradas del acero. El contenido mineral de arcilla absorbe más agua porque tiene más superficie por lo que es altamente eficaz en el deterioro de los metales (Ismail, & El-Shamy, 2009).

- Presencia de agua.

El agua en estado líquido representa el electrolito esencial para las reacciones de corrosión electroquímicas. Por lo tanto, deben tenerse en cuenta factores como la humedad del suelo, la capacidad de retención de agua, el nivel freático y la movilidad del agua en el suelo.

Los resultados de un estudio para evaluar el efecto de la humedad del suelo sobre la corrosión de acero galvanizado mostraron la importante influencia de la humedad del suelo en las tasas de corrosión (Pereira et al., 2015).

- Aireación.

Es bien sabido, que la concentración de oxígeno disminuye con el aumento de la profundidad del suelo. En suelos neutros o alcalinos, la concentración de oxígeno tiene un efecto significativo sobre el grado de corrosión como resultado de su participación en la reacción catódica. Sin embargo, en presencia de ciertas bacterias la corrosión puede ser muy alta incluso en condiciones anaerobias.

Las excavaciones pueden aumentar considerablemente el grado de aireación del suelo. Se acepta generalmente que la tasa de corrosión en suelos perturbados con alta disponibilidad de oxígeno es significativamente mayor que en suelos que no han sido modificados.

- pH.

La gama de valores de pH comunes en los suelos está entre 5 y 8. En este intervalo se considera generalmente que el pH no es un factor dominante en los mecanismos de corrosión. Sin embargo, los suelos más ácidos tienen un riesgo mucho mayor de corrosión en materiales estructurales como el acero. Por otro lado, los suelos alcalinos tienden a presentar altas concentraciones de magnesio y calcio que tienden a formar depósitos sobre superficies enterradas con propiedades protectoras contra la corrosión.

- Resistividad.

Históricamente se ha considerado la principal variable a estudiar en el campo de la corrosividad del suelo. Como el flujo de corrientes iónicas está asociado con las reacciones de corrosión, los suelos altamente resistivos tienden a retardar sus efectos.

La resistividad del suelo generalmente disminuye con el aumento del contenido de agua y la concentración de especies iónicas. Es importante remarcar que la resistividad por sí sola no es suficiente para evaluar el riesgo de corrosión, por lo que su utilidad como único indicador absoluto es muy limitada.

- Potencial redox.

Es esencialmente una medida del grado de aireación del suelo, un alto potencial redox indica un alto nivel de oxígeno. Bajos valores de potencial redox pueden sugerir que las condiciones son favorables para la actividad microbiológica anaeróbica.

- Contenido de iones.

Los componentes químicos más relacionados con la corrosión son los cloruros y los sulfatos. Los iones cloruro son generalmente dañinos porque participan directamente en las reacciones de disolución anódica de los metales. Además, su presencia tiende a disminuir la resistividad del suelo. Los cloruros pueden estar presentes en los suelos de manera natural o provenir de fuentes externas, como el vertido de la sal en las carreteras en invierno.

En cuanto al efecto corrosivo que producen los iones sulfato sobre los metales, es menor que los cloruros. Sin embargo, su riesgo aumenta con la posibilidad de que los sulfatos se conviertan en sulfuros altamente corrosivos debido a la actividad de las bacterias que pueden conducir a la reducción del sulfato anaerobio.

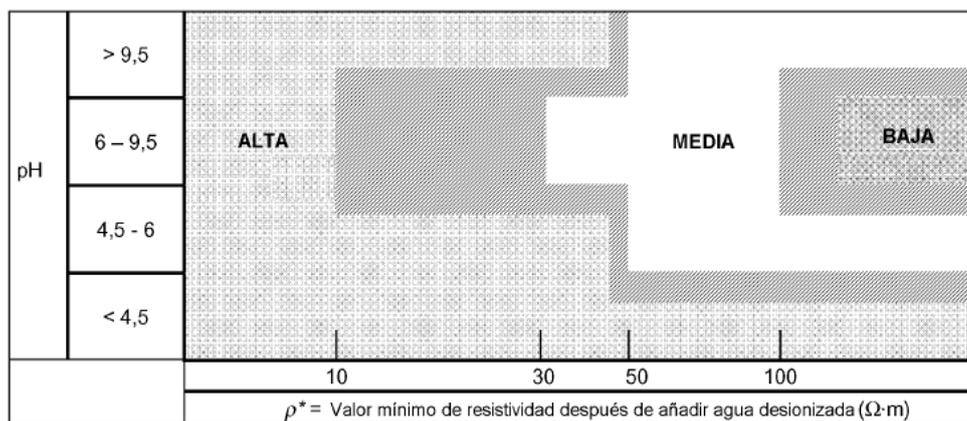
Otro importante compuesto químico desde el punto de vista de la corrosión, es el contenido orgánico que está presente en el suelo. Sus propiedades tienen implicaciones relevantes en el proceso de corrosión del acero (Soriano, & Alfantazi, 2016).

4.1 Métodos cualitativos

Los métodos cualitativos de estimación de la corrosión proporcionan información sobre la capacidad corrosiva de los suelos a partir de las principales variables que la definen. Estos métodos son sistemas de puntuaciones donde el valor de cada variable añade o resta puntos dependiendo de su efecto sobre la naturaleza corrosiva. Como resultado, los usuarios obtienen una clasificación del suelo que indica si es muy corrosivo, poco o incluso no corrosivo.

La principal desventaja de los métodos cualitativos es que no proporcionan estimaciones de la tasa de corrosión y, por tanto, tienen poca aplicación práctica al diseño de estructuras. Un ejemplo sencillo de este tipo de métodos es la norma europea EN 12501-2: 2003 sobre la protección de los materiales metálicos contra la corrosión, proporciona una estimación cualitativa del suelo corrosivo teniendo en cuenta dos variables: pH y resistividad. Este método sugiere algunas orientaciones para determinar la carga de corrosión en los suelos. Su limitación es debida a que sólo establece tres niveles diferentes de corrosión a partir del análisis comparativo de pH y resistividad: alto, medio o bajo, como se muestra en la figura 4.

Figura 4: Carga corrosiva del suelo en función del Ph y la resistividad según EN 12501-2: 2003



Un método similar es la escala de corrosividad del suelo aplicable al acero desarrollada por la American Water Works Association (AWWA). Incluye un estricto ranking generado por la asignación de una puntuación global compuesto de puntos particulares dependiendo de cada variable. En general, el método asume que la resistividad, el pH y la potencia redox son los factores más importantes en la corrosión. Cuando el número total de puntos supera los 10 puntos, la norma recomienda medidas de protección (recubrimientos). Como en el resto de los métodos cualitativos estudiados, no hay una medida concreta de la pérdida de material o valores recomendados.

Otro método cualitativo con características similares fue desarrollado por la Asociación Alemana de Ingenieros de Obras de Agua y Gas, que reflexiona sobre los diferentes factores que afectan a la corrosión para proporcionar una indicación del tipo de suelo respecto a ella.

En cualquiera de los casos de estudio respecto a los métodos cualitativos cabe señalar que ninguno proporciona indicaciones numéricas a tener en cuenta en el diseño. Su finalidad consiste en proponer medidas subjetivas para la posibilidad de corrosión y, por lo tanto, su aplicación durante las fases de diseño es muy restringida.

4.2 Métodos cuantitativos

El hecho de disponer de una estimación cuantitativa de cuál será la tasa de corrosión es una herramienta esencial con indudable utilidad para las personas que diseñan estructuras enterradas de metal. De esta manera, es posible decidir las dimensiones de la estructura que se requieren para garantizar su vida útil desde una visión objetiva.

Los estudios cuantitativos más completos realizados hasta la fecha con referencia a la corrosión del acero en diferentes tipos de suelo fueron realizados por Romanoff para la Oficina Nacional de Normas de Estados Unidos (NBS) entre 1910 y 1955. Malvin Romanoff fue el científico que revolucionó el campo de la corrosión subterránea del acero mediante sus estudios sobre cómo la corrosión ataca los oleoductos. Hasta entonces, había muy poco conocimiento sobre los mecanismos y la evolución de la corrosión de los aceros en aplicaciones subterráneas.

La investigación llevada a cabo por Romanoff consistió en enterrar varias piezas de diferentes calidades de acero en suelos durante largos períodos de tiempo, de meses a varios años, para descubrir cómo el suelo corrosivo afectaba las piezas (Romanoff, 1957). El experimento, en su totalidad, duró 20 años y se llevó a cabo en diferentes lugares de Estados Unidos. Romanoff trató de determinar si era necesario usar revestimientos para evitar la corrosión y descubrir si las propiedades del suelo podrían utilizarse con el fin de predecir la corrosión.

Para asegurar la aplicabilidad de los resultados del estudio se seleccionó un gran número de suelos con características distintas. Estos suelos fueron analizados para determinar sus propiedades físicas, químicas, de tamaño de grano y sus características climáticas. En cada uno de los lugares, se enterró un elevado número de muestras (principalmente tuberías) de diferentes tipos de acero, tanto desnudos como recubiertos. Periódicamente, durante toda la duración de las pruebas, las muestras fueron excavadas (dos a dos) para llevarlas al laboratorio donde los científicos evaluaron su corrosión. Gracias a ello, fue posible evaluar el comportamiento de la corrosión en el acero enterrado en el suelo durante el tiempo.

Los informes finales de los trabajos realizados contienen tablas de datos donde se exponen las informaciones relativas a la corrosión, tanto en términos de pérdida de masa como de profundidad máxima de penetración, para los diferentes materiales y revestimientos utilizados y para cada uno de los suelos estudiados. Un ejemplo de las tablas obtenidas por Romanoff se refleja en su informe original mostrado en la figura 5.

Figura 5. Pérdida de peso y máxima penetración de una muestra llevada a cabo en el estudio de Romanoff (1957).

No.	Soil		Loss in weight			Maximum penetration		
	Type	Duration of exposure	Open-hearth iron	Wrought iron	Bessemer steel	Open-hearth iron	Wrought iron	Bessemer steel
			A	B	M	A	B	M
		<i>Years</i>	<i>oz/ft²</i>	<i>oz/ft²</i>	<i>oz/ft²</i>	<i>Mils</i>	<i>Mils</i>	<i>Mils</i>
52	Lake Charles clay loam	{ 2.0 5.4 7.5	{ 3.1 14.7 19.0	{ 3.4 14.6 19.0	{ 2.7 13.5 16.9	{ 66 116 116	{ 62 123 176	{ 40 118 163
54	Fairmount silt loam	{ 1.9 5.2 7.3	{ 1.0 1.5 3.4	{ 1.0 1.3 2.5	{ 0.7 1.2 3.5	{ 14 14 54	{ 16 21 36	{ 6 11 40
68	Gila clay	{ 1.7 5.1 7.2	{ 3.2 3.7 4.8	{ 3.6 4.3 4.9	{ 2.9 3.7 4.4	{ 42 43 48	{ 50 43 48	{ 37 38 45

En 1988, NBS se convirtió en NIST y uno de sus principales trabajos consistió en hacer un análisis detallado de la información contenida en el trabajo de Romanoff (Ricker, 2010). Este estudio tiene gran relevancia en la evaluación de la corrosión en los suelos dada la completitud, fiabilidad de la fuente y el hecho de que es relativamente reciente. En él, se describen una serie de deficiencias identificadas en los ensayos originales, entre las que se encuentran:

- Diseño estadístico deficiente de los experimentos. El análisis estadístico no fue una parte muy valorada y, en consecuencia, no se desarrollaron procedimientos de medición.
- No tomó en cuenta las variaciones en los horizontes del suelo. Como resultado, las tuberías enterradas en la misma zanja, pero en extremos opuestos, podrían estar expuestas a condiciones muy diferentes.
- Las variaciones estacionales y anuales no fueron contempladas debido al uso de valores promedio anuales para algunas variables (temperatura, precipitación, etc.) y los tiempos de exposición y fechas de inicio de los experimentos varían de un lugar a otro. Las fechas exactas de enterramiento y extracción de las muestras son desconocidas, lo cual es significativo porque el daño por corrosión puede concentrarse en ciertas estaciones. Una muestra con un tiempo de exposición de 1 año y 3 meses puede presentar mucho más grado de corrosión que una muestra con un tiempo de exposición de 1 año porque la primera ha pasado dos veces la temporada más problemática.
- Diferentes profundidades de enterramiento. En cada sitio, los experimentos se realizaron por los métodos más comunes de soterramiento, en lugar de aplicar el mismo procedimiento de preparación del experimento a lo largo del estudio, lo que introduce más incertidumbre en el conjunto de datos.
- Utilización de valores poco representativos para algunas variables. Por ejemplo, la precipitación media utilizada corresponde al lugar más cercano con datos disponibles, y la información corresponde al promedio histórico en lugar de al período de enterramiento del ensayo. Por lo tanto, no se puede conocer el efecto de los años especialmente lluviosos.
- Muchas propiedades se midieron en el laboratorio en lugar de in situ. Las alteraciones generadas en el suelo mediante la eliminación de las muestras tienen un efecto sobre la actividad del agua, dióxido de carbono, oxígeno, etc. Todo ello tiene un efecto sobre el pH, de manera que dichas medidas conllevan un error inherente.
- Información incompleta sobre el análisis químico. Debido a limitaciones presupuestarias sólo se realizó un análisis químico completo de 26 de los 47 emplazamientos iniciales del ensayo. Además, la elección de estos 26 sitios no siguió ningún procedimiento de muestreo aleatorio, si no que se eligieron los que tenían menor resistividad.
- No tuvo en cuenta los posibles cambios en las condiciones del suelo con el tiempo. La actividad humana, por ejemplo, podría haber cambiado las condiciones en cualquiera de los sitios durante los años del experimento, pero no hay información al respecto.

Además de estas limitaciones a causa del procedimiento del ensayo y de las técnicas utilizadas, hay una serie de condicionantes relacionados con la aplicabilidad de los resultados. Por un lado, las aleaciones utilizadas en el estudio difieren significativamente en su composición a las utilizadas comúnmente en el presente. Por otro lado, el propio estudio de Romanoff concluyó que la aplicación cuantitativa de los resultados debe ser muy cuidadosa y restringirse al área próxima a los emplazamientos en los que se desarrolló el ensayo.

Además de los estudios llevado a cabo por el NIST, existen otras investigaciones más recientes realizadas con el objetivo de predecir y cuantificar la corrosión de las estructuras subterráneas. La mayoría de ellos, enfocan la investigación en la monitorización de la corrosión durante la fase del uso de la pieza o estructura.

En 2015, Hui Wang lidero una investigación donde se estudió la corrosión en tuberías de acero enterradas desde un enfoque de agrupamiento basado en el campo aleatorio de Markov (Wang et al., 2015). Este enfoque estableció un algoritmo para clasificar los defectos de corrosión utilizando las propiedades del suelo a través de encuestas in situ. Los defectos de corrosión categorizados revelan los patrones ocultos de degradación de la corrosión en diferentes segmentos a lo largo de una estructura de tubería. Los resultados de este estudio indican que el proceso de propagación externa de la corrosión en una tubería enterrada es dependiente de la posición y está altamente relacionado con el ambiente del suelo y discute una nueva forma de inspección de la corrosión en tuberías ya enterradas.

En el mismo año, Allahkaram estudio la velocidad de corrosión a través de la ley de Faraday y llevo a cabo mediciones de la pérdida de peso debido a la corrosión en gasoductos (Allahkaram et al., 2015). Los resultados del estudio consistieron en establecer un procedimiento de medida de corrosión de las tuberías ya instaladas para estimar el resto de su vida útil.

Tanto con el método de Wang como el de Allahkaran, es posible estimar la corrosión a partir de mediciones in situ, siendo muy útiles para trabajos de mantenimiento, pero no sirven de ayuda a la hora de diseñar las estructuras.

Otras investigaciones se centran en estudiar el efecto de una sola variable en la corrosión, como la humedad (Dang et al., 2015). Sin embargo, es bien sabido que la corrosión final se debe al efecto combinado de varios factores, por lo que este tipo de simplificaciones no es muy útil al diseñar estructuras. También hay modelos que se generan a partir de nuevos ensayos (Velázquez, 2009). Estos experimentos tienen una duración mucho menor que los experimentos del NIST, generalmente un máximo de tres años. Como consecuencia, los resultados tomados de pruebas de tan corta duración se consideran menos representativos que el NIST original, que en algunos casos alcanzó 17 años de duración.

Tras la evaluación de los métodos cuantitativos, es importante mencionar que en el campo del diseño de estructuras metálicas enterradas la estimación de la corrosión normalmente se realiza a través de las tablas de Romanoff.

5. Conclusiones

La corrosión que se produce en las estructuras metálicas cuando están enterradas en el suelo, es una gran preocupación en los ingenieros encargados de proyectos en los que se requiere de su diseño.

Todas las investigaciones recogidas en este artículo sobre la estimación del daño que causa la corrosión en las estructuras metálicas enterradas en el suelo, se han clasificado en función de si corresponden a métodos cualitativos o cuantitativos. Se ha concluido que, en la fase de diseño de las estructuras, los métodos cualitativos proporcionan una orientación de los posibles efectos de la corrosión, pero no otorgan un valor que sirva de ayuda en el dimensionamiento. Por lo tanto, los métodos cuantitativos establecen una mayor exhaustividad y pérdida de subjetividad en la interpretación de las fuentes de información por parte de los ingenieros encargados de la fase de diseño del proyecto.

Además, se ha demostrado que la severidad de la corrosión es resultado de la combinación de una gran cantidad de factores y el estudio de sus efectos en función del comportamiento

individual de una sola variable puede producir errores muy graves en el diseño de las estructuras y en las garantías de su vida útil.

De todas las investigaciones recogidas en este estudio, la fuente de información más importante y utilizada para valorar la corrosión que afecta a los elementos metálicos en diferentes ambientes subterráneos sigue siendo la recogida por el NIST americano sobre la corrosión sufrida por el acero. Se trata de un método cuantitativo y multivariable que todavía no ha podido ser remplazado por ninguna otra metodología. A pesar de las limitaciones que presenta, fundamentalmente por haber sido publicada en 1957, cuenta con la base de datos más completa de resultados de ensayos sobre la corrosión de los metales en los suelos.

Por lo tanto, es posible optimizar el diseño de los elementos metálicos enterrados en proyectos de construcción utilizando modelos que proporcionen estimaciones cuantitativas de la corrosión que experimentarán en el suelo.

5. Bibliografía

- Allahkaram, S. R., Isakhani-Zakaria, M., Derakhshani, M., Samadian, M., Sharifi-Rasaey, H., & Razmjoo, A. (2015). Investigation on corrosion rate and a novel corrosion criterion for gas pipelines affected by dynamic stray current. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 453-460.
- Alter, L. B., & Mestres, F.L. (2004). *Corrosión y protección* (Vol. 150). Univ. Politèc. de Catalunya.
- Bastin, E. S. (1926). The problem of the natural reduction of sulphates. *AAPG Bulletin*, 10(12), 1270-1299.
- Beech, I. B., & Gaylarde, C. C. (1999). Recent advances in the study of biocorrosion: an overview. *Revista de microbiología*, 30(3), 117-190.
- Burstein, G. T., Shreir, L. L., & Jarman, R. A. (1994). *Corrosion 2 Volume Set*. Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann.
- Dang, D. N., Lanarde, L., Jeannin, M., Sabot, R., & Refait, P. (2015). Influence of soil moisture on the residual corrosion rates of buried carbon steel structures under cathodic protection. *Electrochimica Acta*, 176, 1410-1419.
- Ismail, A. I. M., & El-Shamy, A. M. (2009). Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel. *Applied Clay Science*, 42(3), 356-362.
- Javaherdashti, R. (2016). *Microbiologically influenced corrosion: an engineering insight*. Springer.
- Levlin, E. (1993). *Corrosion of water pipe systems due to acidification of soil and groundwater* (Doctoral dissertation, Royal Institute Of Technology, S-100 44 Stockholm 70, Sweden).
- Maruthamuthu, S., Kumar, B. D., Ramachandran, S., Anandkumar, B., Palanichamy, S., Chandrasekaran, M., & Palaniswamy, N. (2011). Microbial corrosion in petroleum product transporting pipelines. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(13), 8006-8015.
- Osella, A., Favetto, A., & López, E. (1998). Currents induced by geomagnetic storms on buried pipelines as a cause of corrosion. *Journal of applied geophysics*, 38(3), 219-233.
- Pereira, R. F. da C., de Oliveira, E. S. D., Lima, M. A. G. de A., Brasil, S. L. D. C. (2015). Corrosion of Galvanized Steel Under Different Soil Moisture Contents. *Mater. Res.*, vol. 18, n.o 3, pp. 563-568.
- Ricker, R. E. (2010). Analysis of Pipeline Steel Corrosion Data From NBS (NIST) Studies Conducted Between 1922–1940 and Relevance to Pipeline Management. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 115(5), 373.
- Roberge, P. R. (2008). *Corrosion Engineering* (p. 708). New York, NY, USA: McGraw-Hill.

- Romanoff, M. (1957). *Underground corrosion*, National Bureau of Standards Circular 579. US Government Printing Office, Washington, 25.
- Schaschl, E., & Marsh, G. A. (1963). Some new views on soil corrosion. *Mater. Protect*, 2(11), 8-17.
- Soriano, C., & Alfantazi, A. (2016). Corrosion behavior of galvanized steel due to typical soil organics. *Construction and Building Materials*, 102, 904-912.
- Starkey, R. L., & Wight, K. M. (1945). *Anaerobic Corrosion of Iron in Soil*, American Gas Assoc. Technical Report (NY).
- Velázquez, J. C., Caleyó, F., Valor, A., & Hallen, J. M. (2009). Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines. *Corrosion*, 65(5), 332-342
- Wang, H., Yajima, A., Liang, R. Y., & Castaneda, H. (2015). A clustering approach for assessing external corrosion in a buried pipeline based on hidden Markov random field model. *Structural Safety*, 56, 18-29.
- Yan, M., Sun, C., Xu, J., & Ke, W. (2014). Anoxic corrosion behavior of pipeline steel in acidic soils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(45), 17615-17624.