

UNIVERSIDAD DE MATANZAS “Camilo Cienfuegos”

Facultad de Ingenierías

Departamento de Ingeniería Mecánica



***Simulación de la corrosión en Tanques de
Petróleo Crudo Nacional mediante el Método de
Elementos Finitos.***

Tesis Presentada en Opción al Título Académico de Máster en
Ingeniería Asistida por Computadora.

Autor: Ing. Jesús Alfonso García.

Tutor: Dr. Eleno Alfonso Brindis

MATANZAS, 2013

RESUMEN

Se implementaron un grupo de funciones programadas en MatLab para la simulación de la corrosión a través del Método de Elementos Finitos. Las mismas fueron comprobadas mediante la simulación del fenómeno en uniones soldadas pertenecientes al fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo crudo, obteniendo la distribución de potenciales y densidad de corriente en el dominio de estudio, lo cual permitió finalmente determinar la velocidad de corrosión y la profundidad de la capa corroída, para caracterizar de esta manera el fenómeno corrosivo. Finalmente los resultados de la simulación fueron comparados con los obtenidos mediante mediciones ultrasónicas de espesores demostrándose la veracidad del modelo.

ABSTRACT

A group of function programmed in MatLAB for the simulation of the corrosion through the Finite Elements Method was implemented. By the simulation of the phenomenon in welding union in the bottom of oil tanks they were proven, obtaining the potential and electric current density distribution in the study domain, which finally permitted to determine the corrosion rate and depth of corroded layer, to characterize the corrosive phenomenon. Finally the results obtained by the simulation and those obtained by ultrasonic measurements of thicknesses were compared, demonstrating the veracity of the model.

TABLA DE CONTENIDOS

Tabla de contenido

| | |
|--|--------|
| Introducción..... | - 1 - |
| CAPÍTULO 1: Estado del arte. | - 3 - |
| 1. Estado Actual de la Temática. | - 3 - |
| 1.2. Mecanismo de corrosión en tanques de almacenamiento de petróleo crudo. | - 11 - |
| 1.3. Corrosión en la zona afectada por el calor de soldadura. | - 13 - |
| 1.4. Modelo matemático de la corrosión. | - 16 - |
| 1.5. Determinación de la velocidad de corrosión. | - 17 - |
| 1.6. Introducción al Método de Elementos Finitos (MEF) | - 18 - |
| 1.6.1. Discretización de dominios planos..... | - 19 - |
| 1.6.2. Selección de las funciones de interpolación..... | - 19 - |
| 1.6.2.1. Elemento triangular linear..... | - 20 - |
| 1.6.2.2. Elemento triangular cuadrático | - 21 - |
| 1.6.2.3. Elemento triangular cúbico | - 21 - |
| 1.6.2.4. Elemento tetraédrico lineal | - 22 - |
| 1.6.2.5. Elemento tetraédrico bicuadrático | - 22 - |
| 1.6.3. Formulación matemática del método. | - 23 - |
| 1.6.4. Ensamblaje y solución del sistema de ecuaciones global. | - 24 - |
| 1.7. Conclusiones parciales del capítulo..... | - 25 - |
| CAPÍTULO 2: Materiales y Métodos. | - 25 - |
| 2.1. Características de los materiales empleados en la fabricación de Tanques de Almacenamiento de Petróleo Crudo..... | - 26 - |
| 2.2. Características del electrolito. | - 27 - |

| | |
|---|--------|
| 2.3. Descripción de la aplicación del método de elementos finitos para solucionar celdas de corrosión. | - 28 - |
| 2.4. Simulación empleando el Método de Elementos Finitos en ANSYS. | - 35 - |
| 2.5. Conclusiones parciales del capítulo..... | - 38 - |
| CAPÍTULO 3: Análisis de los resultados. | - 39 - |
| 3.1. Introducción al problema de estudio. | - 39 - |
| 3.2. Simulación de la corrosión en zona afectada por el calor de la soldadura. | - 39 - |
| 3.3. Validación de los resultados obtenidos. | - 42 - |
| 3.4. Conclusiones parciales del capítulo..... | - 43 - |
| Conclusiones..... | - 43 - |
| Recomendaciones. | - 43 - |
| Bibliografía..... | - 43 - |

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno que provoca daños cuantiosos en numerosas aplicaciones de la industria mecánica, pudiendo traer graves consecuencias. No obstante, en muchas ocasiones no se toma en cuenta durante el diseño mecánico.

La degradación de los materiales producto de la corrosión provoca interrupciones en actividades tecnológicas, pérdida de productos, contaminación ambiental, reducción en la eficiencia de los procesos, mantenimientos y sobrediseños costosos.

Se estima que los gastos atribuidos a los daños por corrosión representan entre el tres y el cinco por ciento del producto interno bruto de los países industrializados; solamente hablando del acero, de cada diez toneladas fabricadas por año se pierden 2,5 por corrosión (Cortés y Ortiz, 2004).

En los últimos años se ha venido desarrollando la aplicación de la computación en función de la solución de problemas ingenieriles e investigaciones, permitiendo lograr un ahorro considerable en recursos materiales y tiempo.

Existen muchos problemas que por su complejidad no pueden ser resueltos a través de soluciones analíticas convencionales y es necesario el empleo de métodos numéricos, que aunque son aproximados, se ha demostrado su fidelidad en numerosas aplicaciones.

Entre los principales métodos numéricos se destacan los de Diferencias Finitas, Elementos de Contorno y Elementos Finitos, siendo este último el que más desarrollo ha alcanzado en los últimos años, permitiendo simular problemas de Elasticidad, Transferencia de Calor y Flujo de Fluidos. La implementación de estos métodos en las computadoras, mediante la programación de algoritmos, se ha convertido en una tarea más para ingenieros.

En la actualidad existe un gran número de programas que permiten realizar estudios sobre este fenómeno, sin embargo los mismos son muy generales y carecen de flexibilidad para ser aplicados a situaciones específicas, además de no disponer en muchos casos de los mismos por requerir de licencias para su uso.

Por tal motivo en los últimos años se han incrementado la programación mediante códigos abiertos, los cuales pueden ser modificados para situaciones específicas. El software MatLab ha

sido una potente herramienta en tales casos, por poseer una biblioteca de funciones preestablecidas de gran ayuda para el programador.

No obstante a lo mencionado anteriormente, se aprecia como **Problema** la inexistencia de un grupo de funciones, que permitan simular el mecanismo de corrosión existente en el fondo de los tanques de petróleo crudo.

Dándole respuesta al problema científico se plantea como **Hipótesis** que Mediante la implementación de un grupo de funciones en Matlab basadas en el Método de Elementos Finitos será posible simular el mecanismo de corrosión existente en el fondo de los tanques de almacenamiento de petróleo crudo.

Por lo expresado anteriormente el **objetivo** de este trabajo es: Implementar un grupo de funciones en Matlab, que permitan simular la corrosión existente en el fondo de los tanques de petróleo crudo.

Los **Objetivos específicos** de este trabajo son:

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre los aspectos teóricos principales para la realización de la investigación.
- Determinar las zonas más afectadas por la corrosión mediante mediciones de espesor por ultrasonido.
- Implementar funciones en MATLAB que permitan simular la corrosión a través del Método de Elementos Finitos.
- Comparar los resultados obtenidos en la simulación con otros programas profesionales y con mediciones ultrasónicas para realizar la validación de las funciones programadas.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

El objetivo de este capítulo es establecer los aspectos teóricos fundamentales relacionados con el empleo del método de elementos finitos para la simulación de problemas de corrosión, basándose en un análisis crítico de las fuentes bibliográficas actualizadas.

1. Estado Actual de la Temática

Tradicionalmente, las investigaciones relacionadas con el tema corrosión se han basado en técnicas experimentales y electroquímicas.

De igual manera, los sistemas de protección catódica contra la corrosión han sido muy estudiados debido a la importancia que revisten. Los trabajos más destacados son los realizados por Koszewski (2001) y que estudia la aplicación de 100mV de polarización en la protección catódica de tanques de almacenamiento de petróleo; Kubik y Lyublinski (2002) estudian la influencia de sistemas de protección catódica e inhibidores en la respuesta corrosiva en el fondo de tanques; mientras Malo, Uruchurtu, Meza y López (2003) evalúan la eficiencia de sistemas de protección catódica y recubrimientos en la disminución de la velocidad de corrosión.

Otras investigaciones sugieren la influencia de los tratamientos térmicos post-soldaduras en la disminución del fenómeno corrosivo. Tal es el caso de Mouri et al. (2002) y Kciuk y Kurc-Lisiecka (2012), que emplean técnicas experimentales para demostrar el efecto del tratamiento térmico en el mejoramiento de las propiedades mecánicas y de la resistencia a la corrosión de aceros aleados; mientras Jiménez (2006) estudia la pérdida por corrosión en aceros Duplex 2205 envejecidos a 875°C.

Varios autores estudian el efecto de los modos de enfriamiento posterior a la soldadura y su relación con la microestructura y la resistencia a la corrosión de las uniones soldadas en aceros inoxidables Duplex 2205 y 2304 (Ramazán, 2003; Quintero et al., 2006; Chen et al., 2012; Tan et al., 2012). Los resultados obtenidos muestran que con la disminución de la velocidad de enfriamiento, aumenta la fracción de austenita y la temperatura crítica de picadura.

En un estudio desarrollado por Terán et al. (2004) se determina la influencia de diferentes métodos de soldadura (SMAW, GMAW y GTAW) en la corrosión intergranular en aceros inoxidables AISI 304 mediante técnicas experimentales y microscopía electrónica de barrido. El método de soldadura más afectado por la corrosión resultó ser el GMAW debido a la formación de

carburo de cromo surgido a partir del calentamiento, que provoca la migración del carbono a la frontera intergranular.

Otros autores (Fernández, 2004; Katayama et al., 2005) consideran en sus modelos factores atmosféricos como son la temperatura y la humedad relativa en la caracterización de la corrosión en varios metales incluido el acero. Se obtuvo que ambos factores influyen directamente en la velocidad de corrosión.

Sin embargo, es necesario conocer aspectos morfológicos de los productos de corrosión, como el tamaño de partícula, la forma de empaquetamiento y la porosidad; así como considerar otros parámetros como la solubilidad y la higroscopicidad de los diferentes compuestos, la influencia de los tenores de humedad en la adsorción de los poluentes sobre los metales, y los umbrales de humedad relativa.

En un estudio comparativo de la corrosión con otras propiedades mecánicas en la superficie de tanques expuestos a diferentes medios (Ezi et al., 2007), se obtuvo que el límite de fluencia, la dureza y la energía de impacto disminuyen con el tiempo de exposición de las muestras.

Guedes et al. (2008) propone un nuevo modelo de corrosión basado en la dependencia no lineal del tiempo en la corrosión, modificado por los diferentes factores medioambientales presentes en un tanque de petróleo crudo. Se tomó en cuenta en este estudio el efecto de la temperatura y las concentraciones de sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono y los resultados obtenidos fueron estadísticamente significativos.

Un modelo desarrollado por Vergara, Reyes y Godoy (2008) expone la relación que tienen diversas mezclas de pavonado, así como el tiempo de aplicación en la pasivación de la corrosión.

En trabajos desarrollados por varios autores (Deng et al., 2009; Chaves y Melsher, 2011) se realizan estudios de la influencia ejercida por el ciclo térmico de la soldadura en la corrosión de aceros inoxidable Duplex UNS S31803 y aceros al carbono API X56-5L respectivamente. Se obtuvo que en aceros inoxidables la reducción más significativa en la resistencia a la corrosión por picaduras ocurre a 850°C ya que a temperaturas por encima de 600°C la austenita se modifica a la fase ferrita, mientras que en los aceros al carbono se obtuvieron los valores mayores de profundidad de las picaduras en la zona afectada por el calor, aunque no se especifica a qué temperatura.

En tanto Curiel et al. (2011) estudiaron la influencia del campo magnético de la soldadura por arco sumergido del acero inoxidable AISI 304 en la corrosión localizada en la zona de influencia térmica. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la aplicación de un campo magnético durante la soldadura provoca una redistribución del cromo en la austenita, lo cual disminuye la precipitación de carburos de cromo en la superficie de los granos y aumenta la resistencia a la corrosión por picaduras.

Los métodos de ensayos electroquímicos han sido igualmente, de los más empleados en los estudios de corrosión, ya que a través de estos es posible estudiar el mecanismo cinético que ocurre durante este fenómeno.

En varios estudios se ha aplicado este método para la caracterización del mecanismo corrosivo que se desarrolla en la zona de soldadura. Entre los más interesantes, Távora y Barboza (2001) determinan que el tipo de electrodo influye en la resistencia a la corrosión de aceros al carbono, aunque existen discrepancias en los resultados obtenidos; Khethier (2012) sostiene que el tipo de bisel de soldadura también influye en este fenómeno, debido a que cuando aumenta el ángulo del bisel disminuye el área y se incrementa la cantidad de calor en la soldadura; García et al. (2008) estudia el mecanismo de corrosión intergranular a través de miniceldas electroquímicas en soldaduras de acero AISI 316L; mientras Dorta et. al. (2009) determina la influencia que ejercen las variables operacionales; intensidad, voltaje y velocidad de avance, sobre la resistencia a la corrosión de soldaduras por arco sumergido de aceros inoxidables dúplex SAF 2205.

Múltiples estudios han estado dirigidos a evaluar la eficiencia aplicación de inhibidores. Tal es el caso de Osman y Shalaby (2002), Sahin et. al. (2002), Deyab y Abd El-Rehim (2007) y Amar et. al. (2008) que emplean inhibidores para la protección de aceros al carbono atacados por agua salada; Keera y Deyab (2005) investigan los efectos de sustancias orgánicas como inhibidoras de la corrosión electroquímica de aceros al carbono; Machnikova (2008) investiga la eficiencia de algunos inhibidores en la protección de aceros al carbono sometidos a un ataque con ácido clorhídrico; mientras Mohana y Badiea (2008) estudian el efecto del nitrito de sodio en la corrosión de aceros de bajo carbono en agua industrial a varias temperaturas.

En otros estudios desarrollados por Bilmes et. al. (2004) y Vargas et al. 2011 se han empleado técnicas electroquímicas para el análisis del efecto de los tratamientos térmicos post-soldadura sobre la corrosión en acero inoxidable martensítico AISI 410 y acero al carbono

API5L-X52 respectivamente. Los análisis de los productos de la corrosión mostraron la formación de sulfuro de hierro y óxido de hierro con diferente morfología en las distintas zonas de soldadura.

En un trabajo realizado por Vega (2006) se realizan curvas de polarización catódica del acero ASTM A-36 en fluido geotérmico, utilizando un electrodo de disco rotatorio a diferentes velocidades de giro, obteniendo que el movimiento del electrolito incrementa el transporte de masa hacia la superficie y reduce la concentración de polarización del electrodo, aumentando la difusión de las especies oxidantes.

En un trabajo desarrollado por Aquino et al. (2008) se determina el grado de sensibilización y potencial de corrosión por picaduras de la soldadura de un acero inoxidable supermartensítico, obteniendo una zona afectada por el calor menos susceptible a la precipitación de carburo de cromo.

Andrade y Martínez (2010) emplean un nuevo método para la polarización de vigas de concreto reforzado a través de la inducción de corriente de un campo eléctrico externo.

En otro trabajo se determina la influencia de la corrosión en las diferentes zonas de soldadura de un acero API 5L X52 empleando técnicas electroquímicas (García et al., 2010 y Arenas y García, 2012), obteniendo que la zona afectada por el calor es la menos propensa a sufrir corrosión localizada, sin embargo es la más susceptible al agrietamiento por tensiones de corrosión.

No obstante, poco se ha investigado sobre el comportamiento de las diferentes zonas de soldadura ante la corrosión electroquímica y existen contradicciones entre los criterios expresados por diferentes autores.

En otro trabajo interesante, Dolores et al. (2012) investigan la influencia de los ciclos térmicos de una soldadura en la corrosión localizada de aceros inoxidables martensíticos de bajo carbono. Se obtuvo el ciclo térmico de la soldadura no genera aumento en el contenido de austenita lo que podría mejorar la resistencia al picado, sin embargo, la superficie del metal de soldadura presenta mayor resistencia a la corrosión localizada que el metal base y la zona afectada por el calor dado que exhibe valores de potenciales más anódicos.

En un estudio reciente, Kalandyk B et al. (2013) estudia la influencia de la velocidad de enfriamiento de la fundición hecha de acero fundido austenítico acidorresistente en la microestructura y la resistencia de corrosión.

A pesar de que históricamente los métodos experimentales y electroquímicos han sido más empleados para estudiar problemas de corrosión, estos resultan altamente costosos y en muchos casos requieren de un período de tiempo prolongado para realizar los ensayos.

En los últimos años, los métodos de inteligencia artificial han adquirido una gran popularidad, no quedando los problemas de corrosión fuera de la aplicabilidad de estos.

En uno de los trabajos pioneros, se obtiene un modelo para la predicción de la corrosión en sobrecalentadores empleando Redes Neuronales Artificiales (Makkonen, 1999). Los métodos nuevos de análisis de corrosión están basados en análisis de imágenes producidas por microscopía óptica y electrónica. La detección de la velocidad de corrosión es obtenida según las dimensiones de las imágenes calibradas. La predicción de corrosión es basada en lógica difusa y en redes neuronales artificiales.

En otros trabajos, Kumar y Buchheit (2008) obtienen un modelo capaz de predecir la vida de revestimientos utilizando los datos obtenidos por métodos experimentales y Moreno et al. (2010) obtienen un modelo predictivo computacional en MATLAB que relaciona los grados de corrosión en las patas de torres de transmisión de energía eléctrica en función de la resistividad del terreno, el potencial e corrosión y la resistencia a la polarización, en ambos casos empleando Redes Neuronales Artificiales.

Un modelo que relaciona la composición química y la temperatura con la conductividad eléctrica de varios electrolitos a base de polímeros fue obtenido empleando redes neuronales artificiales por Rafie et al. (2012). Los errores en los valores obtenidos son mínimos lo que demuestra la validez del modelo.

Los métodos numéricos tenido una gran aplicabilidad desde los años sesenta y a partir del desarrollo de la computación a finales del siglo pasado, se han incrementado la cantidad de trabajos desarrollados en esta temática, debido a su bajo costo si se compara los métodos experimentales tradicionales (Hutton, 2004).

Los principales estudios a través de métodos numéricos han sido realizados empleando elementos finitos y elementos de contorno, principalmente para la simulación de problemas de corrosión galvánica y sistemas de protección catódica.

En un trabajo pionero, Shattuck (1986) emplea el método de elementos finitos para la modelación de sistemas de corrosión galvánica aplicado a condiciones límites de polarización no lineal.

En trabajos desarrollados por Castellani y Corronelli (1999), Castorena et al. (2007), Saether y Sand (2009) y The Ngoc Dao L. et al. (2010) se realiza la simulación de la corrosión en vigas de concreto reforzadas mediante el método de elementos finitos, obteniendo resultados significativos.

En otro estudio se realiza la simulación por elementos finitos de la corrosión fricción en un mecanismo de primera generación (Yamakawa y Kajihara, 2004).

Entre los estudios relacionados con la simulación de sistemas de protección catódica se encuentran los desarrollados por Masuda et al. (2004), que realizan la evaluación de un sistema aplicado a acero reforzado con concreto, empleando el método de elementos finitos. Se consideraron como condiciones de fronteras los potenciales y corrientes de corrosión determinadas a través de técnicas electroquímicas.

Mientras tanto, en otro trabajo destacado, Durstewitz, et al. (2005), realizan la simulación de sistemas de protección catódica con ánodos de magnesio y aluminio en tanques de agua, empleando los métodos de elementos finitos mediante el programa Ansys y elementos de contorno, prediciendo la distribución de potencial y corriente en el medio a proteger. Los resultados obtenidos por ambos métodos fueron similares.

Zhang et al. (2007) emplean el método de elementos finitos para simular el desgaste corrosivo con el tiempo en una placa, considerando propiedades no lineales del material.

En varios trabajos se lleva a cabo la modelación de la propagación del agrietamiento por tensiones de corrosión aplicando elementos finitos (Gavrilov et al., 2007; Scheider et al., 2008 y Kamaya e Itakura, 2009). En estos análisis se consideraron como variables la concentración de oxígeno disuelto, concentración de ácido sulfúrico, intensidad de las tensiones, longitud de la grieta, temperatura, velocidad de flujo, sensibilización y límite de fluencia.

En un trabajo desarrollado por Montoya et al. (2009) se desarrolla un modelo empleando el método de elementos finitos que determina el impacto de la resistividad del concreto en la protección catódica.

Un modelo desarrollado por Ogawa et al. (2009) considera el movimiento del calor de la fuente, la secuencia de deposición, la temperatura entre pasadas, con las propiedades térmicas y mecánicas.

Otro modelo propuesto por Hani y Khaiyria (2010) relaciona la microestructura y el diseño de la soldadura con la corrosión, empleando el método de elementos finitos. Sin embargo, no se detalla con precisión la variación del fenómeno en las diferentes zonas que se crean a raíz del calentamiento producido durante la soldadura.

Otros autores han preferido utilizar el método de elementos de contorno, como Aoki y Kishimoto (1991) que desarrollan un modelo para predecir las respuestas del campo electrogalvánico resultante de la interacción anódica-catódica, en tanto, Amaya y Aoki (2003) emplean dicho método para analizar problemas de corrosión en estructuras complicadas.

Butler et al. (2002) modelan el efecto de los bajos niveles de tensión en la velocidad de corrosión de metales por medio de experimentos y el método de elementos de contorno. Los resultados obtenidos a través de la simulación se comparan con los obtenidos experimentalmente obteniendo la validez del modelo.

En tanto, Uddin et al. (2006) realizan la modelación de microgrietas de corrosión empleando el método de elementos de contorno. En este trabajo se relaciona el factor de concentración de tensiones y el tipo de grieta con la corrosión.

En trabajos desarrollados por Jia et al. (2007) y Tang et al. (2009) y Samsu et al. (2011), se realiza la simulación de la corrosión galvánica en aceros empleando el método de elementos de contorno y en el segundo caso empleando además la técnica iterativa de Newton Raphson. En todos los estudios las condiciones de contorno fueron determinadas a través de las curvas de polarización determinadas experimentalmente.

En otros estudios, se han empleado programas computacionales basados en el método de elementos de contorno para la simulación de sistemas de protección catódica (Adey y Baynham,

s.n; Lan et al., 2012). En ambos casos se determinan la distribución de potenciales y el flujo de corriente por cada nodo, mostrando coherencia con las soluciones analíticas correspondientes.

En menor medida, se han empleado los métodos numéricos de diferencias finitas y volúmenes finitos para la solución de problemas de corrosión.

En una de las primeras investigaciones realizadas, Nesbitt (1995) emplea el método de diferencias finitas para solucionar la ecuación de difusión con condiciones de fronteras de los procesos de corrosión a elevadas temperaturas.

Kranc y Sagües (2001) modelan la distribución de la corrosión en barras de acero reforzadas en concreto, considerando condiciones de fronteras no lineales asociadas con las reacciones de polarización en la superficie del acero y el proceso de transferencia de masa a través del concreto. Se obtuvieron resultados precisos con un gasto computacional pequeño.

Amador (2006), emplea el método de diferencias finitas para la simulación de sistemas de protección catódica en 2D, mientras Sheiner y Hellmich (2009) y Onishi et al. 2012 emplean el método de volúmenes finitos para la simulación de problemas de corrosión por picaduras. Los modelos relacionan las variables actividad de disolución, potenciales de corrosión, conductividad eléctrica, número de carga del metal, concentración iónica de saturación, y concentración del metal. En este último caso se considera además las reacciones químicas involucradas.

En otro modelo obtenido empleando el método de diferencias finitas, se relaciona la concentración de oxígeno disuelto, el pH y diámetro de la tubería con la corrosión (Naser y Karney, 2007).

Mientras en un trabajo más reciente, Chalupecký y Muntean (2012) emplean esta técnica para modelar la corrosión en vigas de concreto reforzadas, aunque los resultados obtenidos no son comprobados experimentalmente.

Otro método empleado por Durstewitz et al. (2007), el de solución fundamental, ha sido aplicado a la determinación de la distribución del potencial eléctrico y densidad de corriente en sistemas de protección catódica aplicados a estructuras de acero inmersas en concreto. Aunque los resultados obtenidos muestran un buen grado de concordancia con los obtenidos por elementos finitos, estos no fueron validados experimentalmente.

En otros trabajos desarrollados por Da Costa et al. (2005) y Napoleão et al. (2007) se modela el efecto de la corrosión por tensiones en un acero austenítico empleando la Mecánica del Medio Continuo. Ambos modelos de predicción son comparados con curvas obtenidas experimentalmente en diferentes soluciones acidas a temperatura ambiente, obteniendo resultados similares.

A pesar de la mayor exactitud de los llamados métodos sin malla, el método de elementos finitos ha sido el preferido por la mayoría de los investigadores, debido a la posibilidad de ser utilizado en una gran diversidad de problemas y en dominios irregulares.

En la actualidad la simulación de fenómenos físicos a través de métodos numéricos ha estado matizada por la utilización de programas profesionales elaborados para la solución de determinados problemas y que carecen de la flexibilidad necesaria para resolver otros que no coincidan con aquellos para los que fueron concebidos, por lo cual, los códigos para programas de propósito general han alcanzado gran popularidad, ya que los mismos pueden ser creados y modificados con facilidad, de forma tal que puedan ser aplicados para resolver diversos problemas (López, 2009).

El fenómeno corrosión ha sido trabajado en este campo por algunos autores, pero en la mayor parte de los casos no se cuenta con los códigos para la solución de un determinado problema, además los mismos se encuentran limitados a casos específicos.

No se han realizado estudios previos empleando métodos numéricos para la simulación de la corrosión en el fondo de los tanques de petróleo crudo, lo cual hace novedoso el tema de investigación.

1.2. Mecanismo de corrosión en tanques de almacenamiento de petróleo crudo.

El mecanismo corrosivo presente en los tanques de almacenamiento de petróleo crudo es muy complejo, en el cual influyen varios factores como es el caso de la composición química y física del crudo.

El mecanismo de corrosión que actúa en la zona más inferior del tanque, varía con respecto a la zona intermedia y a la zona superior (figura 1.1).

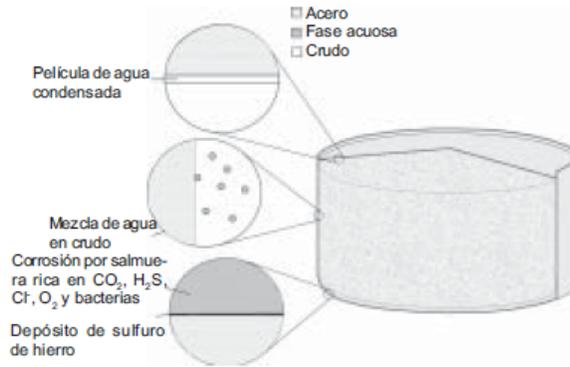


Figura No. 1.1: Zonas de corrosión en tanques de almacenamiento de petróleo crudo.

Fuente: Malo J. M. et al. (2003)

En la parte inferior del tanque, se acumula un nivel de agua, que trae consigo el petróleo crudo desde su extracción de los pozos. Esta agua es rica en aniones cloruros, sulfuros y otras sustancias químicas que producen un efecto de aceleración de la corrosión (Malo et al., 2003).

De acuerdo con Deyab y Abd El-Rehim (2007), las elevadas concentraciones de iones cloruros, sulfuros y dióxido de carbono existentes en el agua de capa traen consigo la aparición de la corrosión por picaduras en la superficie del metal. La velocidad de corrosión por picaduras puede incrementarse hasta 3mm/año (Kubik y Lyublinski, 2002).

Esta agua acumulada en el fondo del tanque es rica en microorganismos que producen corrosión microbiológica en esta zona, tales como las bacterias productoras de ácidos y las bacterias de bajos nutrientes (Malo et al. 2003).

La acumulación de sedimentos y sólidos en conjunto con el movimiento de producto en esta zona puede provocar un mecanismo de desgaste adicional (corrosión fricción), aunque este no predomina si se compara con los casos mencionados anteriormente (Guedes et al., 2008).

De acuerdo con Guedes et. al. (2008) en la superficie de la envolvente del tanque (Shell) la corrosión es muy dependiente de las características químicas y físicas del petróleo crudo. El petróleo crudo pesado forma una película cerosa en la superficie que protege la misma del ambiente corrosivo. Mientras mayor es el espesor de esta película menos posibilidades de desarrollo tiene la corrosión, por lo cual la viscosidad juega un papel fundamental en la disminución del ataque corrosivo.

En la zona superior, se produce la evaporación del petróleo, debido a lo cual se acumulan gases con altos contenidos de sulfuros que al disolverse en vapor de agua componen ácido sulfúrico diluido, que tiene un efecto muy corrosivo. La corrosión química por la acción directa de estos gases también juega un papel fundamental en la pérdida de espesor de esta zona.

En la zona exterior del tanque el aerosol marino juega un papel fundamental, si se toma en cuenta que la zona industrial de Matanzas se encuentra próxima a la costa norte, donde existe un medio ambiente muy agresivo. Esta corrosión atmosférica es un fenómeno totalmente electroquímico, agravado por la acción de iones cloruros y sulfuros presentes en el ambiente de esta zona.

Durante el historial de inspecciones técnicas realizadas, se ha podido verificar visualmente que el fondo y el techo de los tanques son las zonas más afectadas por el efecto de la corrosión. En el primer caso, pudiera provocar derrames de petróleo producto a perforaciones por agrietamiento y picaduras de corrosión.

1.3. Corrosión en la zona afectada por el calor de soldadura.

Múltiples autores se refieren a los cambios microestructurales que ocurren en la zona afectada por el calor de la soldadura y su efecto en la corrosión, fundamentalmente en los aceros austeníticos (Terán et al., 2004; Quintero et al., 2006; García et al. 2008; Deng et al., 2009; Dorta et. al. 2009; Chen et al., 2012; Tan et al., 2012).

En los aceros inoxidables se pueden presentar diferentes tipos de corrosión, tales como corrosión intergranular, corrosión por picaduras, corrosión por esfuerzos o corrosión galvánica, dependiendo del medio agresor y de las condiciones superficiales, rugosidades y esfuerzos residuales (Terán et al., 2004).

En los aceros inoxidables el fenómeno corrosivo surge a partir de la migración de carbono hacia zonas de mayor segregación, lo cual incrementa la formación de carburos de cromo en las fronteras de los granos. Esta situación hace que la concentración de carburo de cromo sea mayor en la frontera reticular que en las zonas contiguas a los mismos, lo que genera una difusión entre una zona y otra, trayendo consigo la disminución de la resistencia a la corrosión en el interior de los granos de que componen la microestructura. A este fenómeno se le denomina sensibilización (Terán et al., 2004; Paitan, 2009; Chen et al., 2012).

De acuerdo con Terán et al. (2004) este fenómeno de corrosión intercrystalina da origen a la corrosión por picaduras en la zona de influencia térmica.

En los aceros al carbono no aleados, ocurren cambios en la microestructura, creándose diferentes fases en las zonas de acuerdo a la temperatura alcanzada. Las zonas formadas son:

- 1) El metal base original, donde la temperatura alcanzada no logra realizar modificaciones en la microestructura del metal.
- 2) La zona afectada por el calor (HAZ, por sus siglas en inglés), en la cual actúan temperaturas por encima de 727°C las cuales modifican la composición microestructural del metal. En esta zona aún no ha ocurrido la fusión del metal.
- 3) La zona de fusión, en la cual las altas temperaturas, superiores a los 1200 °C provocan la fusión del metal base y el metal de aporte.

De acuerdo con Nichols (1998), el metal base es una mezcla de granos de ferrita blanca con carburos precipitados en ella. Metalográficamente, es conocido como perlita. Cuando el metal se calienta por encima de 727°C, la ferrita se transforma en austenita con carbono disuelto. Como la zona afectada por el calor se enfría después de completada la soldadura, esta se puede transformar de nuevo a ferrita con carburos en ella o, si el enfriamiento es lo suficientemente rápido, en martensita. Esta martensita es dura y quebradiza y puede provocar tensiones que conduzcan al agrietamiento del metal. Estos cambios microestructurales generan zonas de diferentes potenciales.

Acorde a lo expresado por Uhlig (1985) y Roberge (2000), cuando en una misma superficie metálica ocurre una diferencia de potencial en zonas muy próximas entre sí, se establece una migración electrónica desde la zona donde se encuentra el potencial de oxidación más pequeño hacia aquella donde se encuentra el potencial de oxidación más elevado, trayendo consigo la pérdida de electrones en el ánodo y la acumulación de productos insolubles de la corrosión en el cátodo. El conjunto de las dos semirreacciones constituye una celda de corrosión electroquímica.

Estos cambios en la microestructura del metal provocan variaciones en los potenciales de oxidación de las diferentes zonas, originando microceldas galvánicas de gran actividad.

De acuerdo con Távora y Barboza (2001) y Vargas et al. (2011), los cordones de soldadura constituyen las zonas críticas más susceptibles donde podría iniciarse la corrosión, seguido por la zona de influencia térmica y el metal base.

Un criterio emitido por Vargas et al. (2011) plantea que normalmente los cordones de soldadura presentan valores de potenciales más anódicos, en tanto Távora y Barboza (2001) exponen que este hecho ocurre debido a la presencia de defectos superficiales, inclusiones, heterogeneidades estructurales que lleva consigo la unión soldada.

Estas inclusiones son centros activos para que se inicie la corrosión debido a su gran diferencia en la composición química respecto al acero, formando micropilas galvánicas de gran potencial electroquímico, y debido a la gran disolución química que presentan éstas inclusiones en contacto con iones agresivos como los cloruros (Távora y Barboza, 2001).

La interacción de microánodos con la amplia superficie catódica de la pieza, provocan la disolución puntualmente localizada del metal en dicho punto (picadura), o sea, las picaduras ocurren a través de un proceso de disolución local anódica donde la pérdida de metal ocurre por la presencia de un ánodo pequeño y un cátodo grande (Colectivo de Autores, 2008; Paitan, 2009).

En trabajos desarrollados por Chaves y Melsher (2011, 2012) se obtuvo que la máxima profundidad de las picaduras y la velocidad de corrosión mayor en soldaduras longitudinales de piezas de acero al carbono se encuentra en la zona afectada por el calor.

Un criterio diferente expresa que el metal de soldadura y la zona afectada por el calor son más resistentes a la corrosión electroquímica por sulfuro de hidrógeno que el metal base (García et al., 2010).

La región más susceptible al agrietamiento es la zona afectada por el calor y esto se debe a la transformación inducida por el calor de la soldadura y que proporciona las condiciones para la corrosión por esfuerzos y/o daño por hidrógeno (García et al., 2010).

Sin embargo, poco se ha investigado y existen contradicciones sobre el comportamiento y susceptibilidad de las regiones de la soldadura ante este tipo de corrosión. Se desconoce si la zona afectada por el calor es especialmente susceptible a la corrosión electroquímica, de modo similar a su comportamiento ante el agrietamiento por tensiones de corrosión (García et al., 2010).

1.4. Modelo matemático de la corrosión.

De acuerdo a lo expresado por Durstewitz et al. (2005) la ecuación gobernante de la distribución de potenciales en electrostática es la ecuación de Laplace.

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad 1.1$$

La ecuación de Laplace es válida cuando la corrosión es puramente electroquímica y no existe término generador, en tal caso, la ecuación gobernante sería la de Poisson. A manera de ejemplo puede citarse la corrosión por picaduras o la corrosión bajo tensión. En el primero de los casos, el término generador sería el microánodo que da origen al desarrollo de la picadura, y en el segundo caso, el valor del esfuerzo aplicado a la estructura que se esté analizando. En estos casos la ecuación quedaría:

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - b = 0 \quad 1.2$$

Siendo b el término generador.

La variación de potencial Δu en el dominio Ω provoca el flujo de corriente i que da origen a la corrosión. De acuerdo con DeGiorgi (1992) el flujo de corriente no es más que la variación de potencial con respecto a la normal al límite.

$$i = \frac{\partial u}{\partial n} \quad 1.3$$

Sin embargo, se debe tomar una consideración especial. Tomando en cuenta el fenómeno corrosión es un fenómeno análogo a los procesos de transferencia de calor, considerando que el voltaje u es equivalente a la temperatura T y el flujo de corriente i equivalente al flujo de calor q , se debe considerar un factor equivalente a la conductividad térmica k (Durstewitz et al. (2005). Entonces el flujo de corriente es expresado:

$$i = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial u}{\partial n} \quad 1.4$$

Donde ρ es la resistividad del medio o electrolito y sus unidades son Ohm-cm. Teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica es una función inversa de la resistividad, entonces la densidad del flujo de corriente en 2D puede expresarse:

$$\vec{i} = K \left[\frac{\partial u}{\partial x} nx + \frac{\partial u}{\partial y} ny \right] \quad 1.5$$

Sin embargo, la ecuación de Laplace no contiene información acerca de las reacciones químicas entre los metales involucrados. En esto juega un papel fundamental la polarización, que no es más que la relación entre la densidad del flujo de corriente tanto anódica como catódica y el potencial. Las curvas de polarización juegan un papel fundamental en la determinación de la corriente de corrosión y en la precisión de la simulación de los procesos de corrosión (Durstewitz et al. (2005).

En la región de la respuesta de Tafel, la relación de la polarización entre la corriente eléctrica y el potencial eléctrico es lineal, sin embargo, en general la relación es no lineal. Las respuestas anódicas y catódicas de la polarización no son representadas típicamente por una solución analítica. La respuesta de la polarización en condiciones de límite son del tipo tres o Cauchy donde las condiciones de límite tienen una dependencia funcional de la variable dependiente, el potencial eléctrico en este caso. La condición de límite de Cauchy también se conoce como condiciones de límite mezcladas (DeGiorgi, 1992).

1.5. Determinación de la velocidad de corrosión.

Acorde con lo expresado por DeGiorgi (1992), la magnitud de la corrosión puede ser determinada por la pérdida de peso por unidad de tiempo, estando relacionada esta pérdida de peso con la carga eléctrica, la cual puede ser determinada a través de la Ley de Faraday:

$$Q = \frac{n \cdot F \cdot W}{M} \quad 1.6$$

Siendo F la constante de Faraday (96 486 Coulombs/mol), n el número de electrones transferidos, W el peso de las sustancias reactivas y M el peso molecular de las sustancias reactivas.

Teniendo en cuenta que la carga eléctrica está dada por el producto de la corriente eléctrica por el tiempo, la ley de Faraday se modifica de la siguiente manera:

$$I \cdot t = \frac{n \cdot F \cdot W}{M} \quad 1.7$$

Finalmente, en esta ecuación se puede despejar la relación W/t que representa la velocidad de corrosión (CR) en unidades de masa por unidad de área en el tiempo:

$$CR = \frac{I \cdot M}{n \cdot F} \quad 1.8$$

Mediante esta expresión se determina la pérdida de peso en un tiempo determinado a través de la cual se caracteriza la velocidad de corrosión.

De acuerdo con Geller y Rajshtadt (1984), un factor de gran importancia a la hora de realizar una valoración del proceso de corrosión, es la profundidad de la capa corroída:

$$HC = \frac{CR}{\rho} \cdot 10^{-3} \quad 1.9$$

Siendo ρ la densidad del metal.

Esta expresión lineal obtiene el comportamiento de la profundidad de la corrosión en función de la velocidad de corrosión considerando que este fenómeno físico actúa uniformemente en la superficie del metal. Aunque en la práctica la corrosión no ocurre uniformemente, esta expresión ofrece una idea clara de la cantidad de material corroído.

1.6. Introducción al Método de Elementos Finitos (MEF)

Para el análisis de problemas que presenten condiciones geometrías complejas, el método de elementos finitos se ha convertido en una herramienta muy útil. De acuerdo con Liu y Quek (2003), Weck (2007) y Fish y Belytschko (2007) este método maneja una variedad ancha de aplicaciones de la ingeniería, tales como problemas estructurales, de transferencia de calor, flujo de fluidos y problemas electroestáticos.

La idea básica del Método Elementos Finitos es encontrar la solución de un problema complejo, reemplazándolo por uno más simple (Rao, 2005 y Lewis et al. 2004). Esto es posible lograrlo mediante la discretización del dominio, el cual es dividido en múltiples elementos interconectados entre sí a través de puntos nodales. A cada elemento corresponde una ecuación, cuya unión permite formar un sistema de ecuaciones que lleva finalmente a una ecuación de

equilibrio global. Resolviendo este sistema de ecuaciones es posible determinar las incógnitas en cada uno de los elementos.

Desde que el problema real es reemplazado por uno más simple, se introducen errores inherentes, por lo que se obtiene una solución aproximada en lugar de una solución exacta e aquí una de sus desventajas fundamentales (Roynance, 2001, Rao, 2005, Amador, 2006 y Weck, 2007).

Este error es posible disminuirlo aumentando el número de divisiones del dominio, o sea, realizando un mallado más fino.

De acuerdo con Lewis et al. (2004), la solución de un problema a través del Método de Elementos Finitos puede ser obtenida acorde a los siguientes pasos:

- Idealización
- Modelación
- Discretización del continuo
- Seleccionar las funciones de interpolación
- Formulación de las ecuaciones para los elementos
- Ensamblar las ecuaciones de los elementos para obtener un sistema de ecuaciones global.
- Solución del sistema de ecuaciones

1.6.1. Discretización de dominios planos.

Durante la discretización, el dominio es dividido en un número de subregiones llamadas elementos, las cuales se interconectan a través de un número de nodos. El número, tipo, el tamaño, y el arreglo de los elementos deben ser definidos (Rao, 2005).

El tipo de elemento a emplear depende del problema físico y su tamaño influye notablemente en la exactitud de los resultados y en el costo computacional (Rao, 2005).

1.6.2. Selección de las funciones de interpolación

La selección de las funciones de interpolación permitirá determinar la solución desconocida en los elementos, a partir de los valores nodales correspondientes al mismo.

$$U_e = NU \quad 1.10$$

En esta ecuación, N es la matriz de interpolación de los elementos y U el vector con las componentes nodales del potencial.

El grado del polinomio de las funciones de interpolación, influye en la exactitud de los resultados, por lo cual a menudo se usan formas polinómicas para obtener resultados más precisos (Hutton, 2004).

1.6.2.1. Elemento triangular lineal.

El elemento triangular lineal es uno de los elementos más simples y versátiles en dos dimensiones, el cual está compuesto por tres nodos en los vértices (Fish y Belytschko, 2007 y López, 2009).

Para cada uno de los nodos del elemento triangular lineal las ecuaciones de las funciones de forma o interpolación quedan:

$$\begin{aligned}
 N_1 &= \frac{1}{2A} [(x_2 y_3 - x_3 y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y] \\
 N_2 &= \frac{1}{2A} [(x_3 y_1 - x_1 y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y] \\
 N_3 &= \frac{1}{2A} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y]
 \end{aligned}
 \tag{1.11}$$

Siendo A , el área del triángulo que se determina:

$$A = \frac{1}{2} \det \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_1 \\ 1 & x_3 & y_1 \end{bmatrix}
 \tag{1.12}$$

En forma isoparamétrica, para los elementos triangulares lineales, las funciones de forma se establecen iguales a las coordenadas locales.

Los elementos triangulares lineales tienen como desventaja que son relativamente inexactos y por esto no se recomiendan para algunos análisis por elementos finitos (Fish y Belytschko, 2007).

El elemento triangular es menos preciso que los elementos cuadriláteros lineales, sin embargo, su adaptatividad a geometrías complejas lo hace un elemento muy útil (Liu y Quek, 2003).

1.6.2.2. Elemento triangular cuadrático

Este tipo de elemento está compuesto por seis nodos, tres en los vértices y tres en el centro de cada lado (López, 2009).

La aproximación cuadrática para un elemento triangular se obtiene:

$$T = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 y^2 + \alpha_6 xy \quad 1.13$$

Las funciones de forma para cada nodo estarán representadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} N_1 &= (2\zeta_1 - 1)\zeta_1 & N_2 &= (2\zeta_2 - 1)\zeta_2 & N_3 &= (2\zeta_3 - 1)\zeta_3 \\ N_4 &= \zeta_1\zeta_2 & N_5 &= \zeta_2\zeta_3 & N_6 &= \zeta_1\zeta_3 \end{aligned} \quad 1.14$$

Este tipo de elemento al ser cuadrático, presenta aristas curvas, lo cual incrementa la adaptatividad y permite mejorar la exactitud con respecto a los elementos triangulares lineales (Fish y Belytschko, 2007).

1.6.2.3. Elemento triangular cúbico

El elemento triangular cúbico, tiene diez nodos, de los cuales tres están en los vértices, seis distribuidos regularmente en los lados y uno en el centroide del triángulo (López, 2009).

Las funciones de forma para los elementos triangulares cúbicos se determinan:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{2}(3\zeta_1 - 1)(3\zeta_1 - 2)\zeta_1 & N_2 &= \frac{1}{2}(3\zeta_2 - 1)(3\zeta_2 - 2)\zeta_2 \\ N_3 &= \frac{1}{2}(3\zeta_3 - 1)(3\zeta_3 - 2)\zeta_3 & N_4 &= \frac{9}{2}\zeta_1\zeta_2(3\zeta_1 - 1) \\ N_5 &= \frac{9}{2}\zeta_1\zeta_2(3\zeta_2 - 1) & N_6 &= \frac{9}{2}\zeta_2\zeta_3(3\zeta_2 - 1) \\ N_7 &= \frac{9}{2}\zeta_2\zeta_3(3\zeta_3 - 1) & N_8 &= \frac{9}{2}\zeta_3\zeta_1(3\zeta_3 - 1) \\ N_9 &= \frac{9}{2}\zeta_1\zeta_3(3\zeta_1 - 1) & N_9 &= 27\zeta_1\zeta_2\zeta_3 \end{aligned} \quad 1.15$$

1.6.2.4. Elemento tetraédrico lineal

Los elementos tetraédricos más sencillos, son los rectangulares lineales. Estos presentan una mayor exactitud que los elementos triangulares lineales, sin embargo, su principal desventaja es la adaptabilidad a geometrías que no sean rectángulos (Liu y Quek, 2003).

Los elementos rectangulares lineales las funciones de forma se determinan a través de las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1-\eta) & N_2 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1+\eta) & N_4 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1+\eta) \end{aligned} \quad 1.16$$

Estas funciones de forma satisfacen las propiedades de la Delta de Kroenecker (Fish y Belytschko, 2007).

Un elemento mucho más práctico y útil es el llamado cuadrilátero, en el cual sus aristas pueden no ser paralelas y con lo cual mejoran la adaptatividad a geometrías complejas. Sin embargo, su principal dificultad radica en la integración de las matrices de rigidez para este tipo de elemento, ya que no puede ser empleado directamente el método de Gauss por la forma irregular del dominio de integración. (Liu y Quek, 2003).

1.6.2.5. Elemento tetraédrico bicuadrático

El elemento rectangular bicuadrático presenta cuatro nodos en los vértices, cuatro en los puntos medios de cada lado y uno en el centro del cuadrilátero, para un total de 9 nodos (López, 2009).

Las funciones de forma en los elementos tetraédricos bicuadráticos se determina:

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1-\eta)\zeta\eta & N_2 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1-\eta)\zeta\eta \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\zeta)(1+\eta)\zeta\eta & N_4 &= \frac{1}{4}(1-\zeta)(1+\eta)\zeta\eta \\ N_5 &= -\frac{1}{2}(1-\zeta^2)(1-\eta)\eta & N_6 &= \frac{1}{2}(1-\zeta)(1-\eta^2)\zeta \end{aligned} \quad 1.17$$

$$N_7 = -\frac{1}{2}(1 - \zeta^2)(1 + \eta)\eta \quad N_8 = \frac{1}{2}(1 + \zeta)(1 - \eta^2)\zeta$$

$$N_9 = -(1 + \zeta^2)(1 - \eta^2)$$

Debido a que su naturaleza es cuadrática, presenta una mayor exactitud que los elementos rectangulares lineales.

Para los elementos cuadráticos de orden superior, las funciones de forma se calculan multiplicando los polinomios de Lagrange, ajustados para las coordenadas ξ y η . (Liu y Quek, 2003 y López, 2009).

1.6.3. Formulación matemática del método.

Teniendo en cuenta su naturaleza electroquímica, la ecuación general de elementos finitos puede determinarse siguiendo la Ley de Ohm (Lewis et al., 2004):

$$\{i\} = [K]\{u\} \quad 1.18$$

Siendo $\{i\}$ el vector de flujo de corriente (Condiciones de frontera tipo Neumann) y $\{u\}$ el vector de potenciales electroquímicos (condiciones de fronteras tipo Dirichlet).

La matriz de rigidez $[K]$ representa la matriz de conductividad, la cual se determina:

$$[k_c] = \iiint_V [B]^T [D][B]dV = tA[B]^T [D][B] \quad 1.19$$

Donde $[B]$ es la matriz de variaciones de forma la cual para elementos triangulares se determina:

$$[B] = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} b_i & b_j & b_k \\ c_i & c_j & c_k \end{bmatrix} \quad 1.20$$

Donde:

$$\begin{array}{lll} \alpha_i = x_j y_m - x_m y_j & \alpha_j = x_m y_i - x_i y_m & \alpha_m = x_i y_j - x_j y_i \\ \beta_i = y_j - y_m & \beta_j = y_m - y_i & \beta_m = y_i - y_j \\ \gamma_i = x_m - x_j & \gamma_j = x_i - x_m & \lambda_m = x_j - x_i \end{array} \quad 1.21$$

y $[D]$ es la matriz de propiedades del material:

$$[D] = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 \\ 0 & k_{yy} \end{bmatrix} \quad 1.22$$

Las constantes k_{xx} y k_{yy} son la conductividad eléctrica en dirección de las abscisas y ordenadas respectivamente. Para materiales isotrópicos ambos valores son iguales.

El gradiente de potenciales puede ser determinado por:

$$Grad(u) = [B]\{u\} \quad 1.23$$

El flujo de corriente es determinado por el producto del gradiente de voltajes y la matriz de propiedades del material.

$$\{i\} = [D] \cdot Grad(u) \quad 1.24$$

1.6.4. Ensamblaje y solución del sistema de ecuaciones global.

Una vez determinada la matriz de rigidez de cada elemento es necesario realizar el ensamblaje de la matriz de rigidez global:

$$[K] = \sum_{i=1}^n [ke] \quad 1.25$$

Durante la etapa de solución se instrumentan las ecuaciones algebraicas de forma matricial y se determinan los valores desconocidos de la variable primaria (potencial) y luego se sustituyen estos para determinar las variables adicionales (Hutton, 2004).

Para los problemas lineales, el sistema de ecuaciones puede ser solucionado muy fácilmente. Sin embargo, para los problemas no lineales la solución tiene que ser obtenida en una secuencia de pasos, modificando la matriz de rigidez K y/o las condiciones de frontera.

1.7. Conclusiones parciales del capítulo.

La revisión bibliográfica realizada ha permitido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Los métodos numéricos de elementos finitos y elementos de contorno permiten realizar análisis de la corrosión con gran precisión y adaptándose a una gran variedad de situaciones.
2. Existen contradicciones en los estudios sobre el comportamiento de la corrosión electroquímica en las diferentes zonas afectadas por la soldadura.
3. Las condiciones de fronteras en la mayoría de los estudios reportados están basadas en las curvas de polarización obtenidas experimentalmente.
4. No existe ningún estudio previo relacionado con la simulación de la corrosión en el fondo de los tanques de petróleo crudo nacional.

CAPÍTULO 2: MATERIALES Y MÉTODOS.

El objetivo de este capítulo es explicar la metodología empleada para la realización de la simulación, así como las características de los materiales y equipos empleados durante la investigación.

2.1. Características de los materiales empleados en la fabricación de Tanques de Almacenamiento de Petróleo Crudo.

Para el desarrollo de la investigación fue escogido el tanque número 29, el cual se clasifica como tanque cilíndrico vertical de techo fijo. Entre sus principales características, presenta dimensiones de 45.6m de diámetro, altura 11.92m y capacidad operacional de 17601m³.

El fondo está compuesto por planchas de acero al carbono ASTM A-36 de dimensiones 6000x2000x8, cuyas propiedades químicas y mecánicas fundamentales se presentan a continuación según certificado de control de la calidad ofrecido por fabricante.

Tabla 2.1: Composición química del acero A-36.

| Elementos | Cantidad (%) |
|--------------|--------------|
| Carbono (C) | 0.26 |
| Fósforo (P) | 0.04 |
| Azufre (S) | 0.05 |
| Silicio (Si) | 0.34 |
| Cobre (Cu) | 0.21 |

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas del acero A-36.

| Propiedad | UM | Valor |
|---------------------------|---------------------|-------|
| Resistencia a la tracción | Kgf/mm ² | 36 |
| Límite de fluencia | Kgf/mm ² | 24 |
| Elongación | % | 21 |

Este acero está compuesto fundamentalmente por carbono, silicio y cobre, aunque presenta pequeñas cantidades de azufre y fósforo.

El carbono es un elemento que influye positivamente, pues su aumento trae consigo la aparición del estado pasivo y la disminución de la velocidad de corrosión. El silicio ayuda en la

descomposición de la cementita, teniendo así un efecto favorable. El azufre se combina con el hierro, creando sulfuros de hierro que actúan como zonas catódicas, acelerando la corrosión. Por otra parte, el cobre, actúa favorablemente en el aumento de la resistencia a la corrosión del metal.

Entre sus principales propiedades mecánicas presenta una baja dureza, en comparación con otros aceros, sin embargo, su elevada tenacidad y maquinabilidad, así como su buena soldabilidad lo hace muy útil en la práctica, empleándose sobre todo en la fabricación de estructuras.

Estas planchas son unidas a solape mediante soldadura manual por arco eléctrico, en un proceso donde no existe un procedimiento adecuado y no se controlan los parámetros de soldadura.

Como metales de aporte se emplean los electrodos E-6013 para el pase de raíz y relleno por tener buena penetración y E-7018 para las pasadas de acabado.

Tabla 2.3: Composición química de los electrodos empleados en el proceso de soldadura.

| Electrodo | C | Mn | Si | P | S | Mo |
|------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|-----------|
| E-6013 | 0.07 | 0.5 | 0.35 | - | - | - |
| E-7018 | 0.12 | 0.9 | 0.8 | 0.3 | 0.3 | 0.65 |

La presencia de una composición química disímil, hace que las propiedades de la zona fundida difieran con respecto al metal base, lo cual promueve a la aparición de celdas galvánicas de concentración diferencial. Por otra parte, la presencia de defectos como escorias, inclusiones metálicas en la soldadura, provoca la aparición de microánodos que promueven la corrosión por picaduras.

2.2. Características del electrolito.

La sustancia que actúa como electrolito en el fondo de los tanques de petróleo crudo es la llamada agua de capa, la cual viene inmersa en el petróleo desde que este es extraído de los pozos. Al ser almacenado este petróleo en los tanques de almacenamiento y entrar en reposo, esta agua se desplaza hacia el fondo por su mayor densidad.

Las propiedades físicas y químicas fundamentales de esta sustancia fueron determinadas mediante ensayos químicos realizados en el Laboratorio de Ensayos E.P.E.P.Centro, ubicados en la Finca La Cachurra, Guásimas, Cárdenas. Los métodos empleados fueron el ALPHA 2510 para

la determinación de la conductividad eléctrica y el ALPHA 4500 para la composición química. Los resultados obtenidos son mostrados a continuación.

Tabla 2.4: Propiedades físicas y químicas del agua de capa.

| Parámetro | U/M | VALOR |
|-------------------------|------------|--------------|
| Conductividad eléctrica | mS/cm | 29.8 |
| pH | - | 6.7 |
| Cloruros | mg/L | 11826.0 |
| Sulfatos | mg/L | 110.0 |
| Nitrógeno Total | mg/l | 13.2 |
| Carbono Orgánico | mg/l | 7.4 |
| Nitrógeno Orgánico | mg/l | 9.2 |
| Fosfatos | mg/l | 2.5 |
| Fosforo Total | mg/l | 3 |
| Nitritos | mg/l | 2.8 |
| Nitratos | mg/l | 1.72 |
| Amoniaco | mg/l | 2.11 |
| Sólidos suspendidos | mg/l | 183 |

Esta agua de capa presenta una conductividad eléctrica muy elevada, aproximadamente a una razón de 75 veces superior con respecto al agua potable y 25 veces superior con respecto al agua salada natural; un pH inferior a 7 que indica una concentración ácida.

La disminución del pH provoca la destrucción de la película protectora formada en la superficie, lo cual hace que fenómeno corrosivo sea continuo (Colectivo de autores, 2008), mientras que la alta concentración de iones cloruros y sulfatos, favorecen notablemente el desarrollo de la corrosión por picaduras.

2.3. Descripción de la aplicación del método de elementos finitos para solucionar celdas de corrosión.

Para la programación y corridas de las subrutinas creadas en Matlab, se empleó una computadora personal marca ASUS modelo P5G41 con un microprocesador Intel Dual Core con velocidad de 2.00GHz, Memoria RAM de 1.00GB y un Disco Duro de 750GB.

Se empleó el programa Matlab 7.0 para la creación de las subrutinas basadas en el procedimiento matemático del método de elementos finitos, que posteriormente permitieron la simulación del fenómeno corrosivo en diferentes zonas del fondo de los tanques de petróleo crudo.

Inicialmente se simularon de forma individual las celdas electroquímicas de cada una de las zonas presentes en el fondo de los tanques (zona fundida, zona de influencia térmica y metal base), y luego se realizó esta operación de manera conjunta.

2.3.1. Algoritmo general de la aplicación.

A continuación se muestra el algoritmo general de la aplicación (figura 2.1), el cual está compuesto por siete partes fundamentales que son detalladas continuación.

2.3.2. Entrada de Datos.

Los datos de entrada requeridos por el programa están divididos en tres tipos de datos: propiedades constitutivas de los materiales, propiedades geométricas y propiedades del mallado.

Propiedades constitutivas de los materiales:

- Voltaje de corrosión anódico (u_a) en V.
- Voltaje de corrosión catódico (u_c) en V.
- Densidad del material (d) en g/cm^3 .
- Conductividad eléctrica del electrolito (k) en S/cm^2 .

Propiedades geométricas:

- Dimensiones del dominio. Ancho (x) y altura (y) en cm.
- Espesor (t) en cm.

Propiedades del mallado

- Número de divisiones en x (ex)
- Número de divisiones en y (ey)

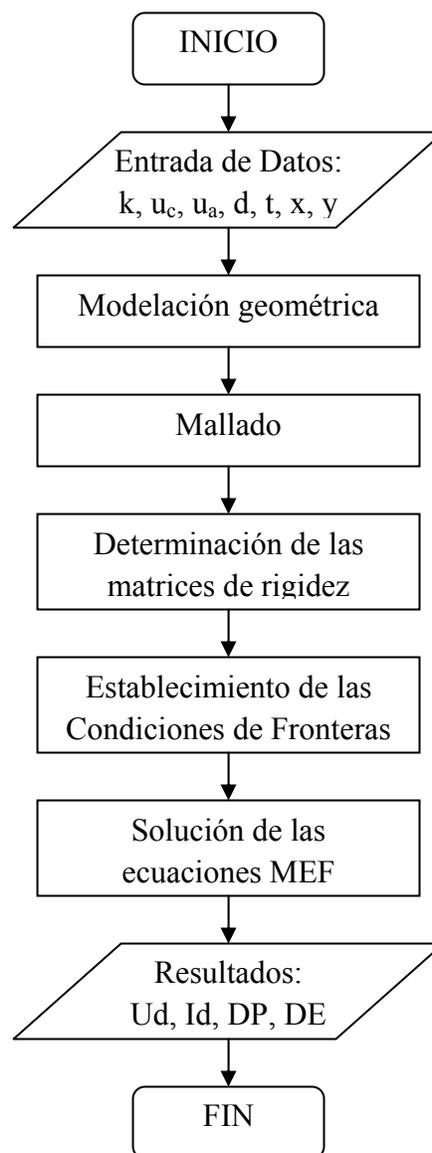


Figura 2.1: Algoritmo de la aplicación.

En cuanto a las dimensiones del dominio, la celda de corrosión se modela con dimensiones de 1cm de ancho y de alto, que corresponden con las dimensiones de las probetas sometidas a los ensayos electroquímicos.

Para la simulación de la zona de soldadura, se emplean como dimensiones del dominio un ancho de 5cm, en el cual se encuentran las diferentes zonas afectadas por el calor, y altura de 1cm.

El espesor empleado es 0.8cm que coincide con el espesor nominal de las planchas que conforman el fondo de los tanques de almacenamiento. La conductividad eléctrica empleada es $0.0298\text{S}/\text{cm}^2$, determinada mediante ensayos químicos (Tabla 2.4).

Los valores de los voltajes de corrosión empleados son determinados a través de las curvas de polarización obtenidas por García et al. (2010) para este tipo de acero a diferentes distancias de la soldadura.

El número de elementos es utilizado posteriormente en la generación del mallado. Para el caso de las celdas electroquímicas se emplearon 8 elementos en ambas direcciones, mientras para la región de soldadura se emplearon 40 divisiones en x y 10 divisiones en y.

2.3.3. Modelación de la celda.

Teniendo en cuenta que el modelo es sencillo, por ser una placa cuadrada, se emplea una matriz de coordenadas de los puntos extremos del contorno, denominada como G y el comando *line* para la unión de cada punto mediante líneas.

```
G = [0 x x 0 0;0 0 y y 0];    %Matriz de 2xn con las coordenadas de los puntos.  
line(G(1,:),G(2,:));        %Unión de los puntos mediante líneas.
```

La matriz que define las coordenadas de los puntos de la geometría G, cuenta con dos filas, la primera para las coordenadas en x y la segunda fila para las coordenadas en y, además de n columnas que representan las coordenadas de los puntos que definen la geometría del dominio, colocados de manera ordenada desde 1 hasta n.

El comando *line* requiere las coordenadas de los puntos del dominio en x e y, por lo cual en sus argumentos se le introducen las filas 1 y 2 de la matriz G.

2.3.4. Descripción del mallado.

La generación del mallado está basada en la utilización de elementos triangulares lineales, mediante los comandos *Meshgrid* para la generación de las coordenadas de los nodos y *delaunay* para realizar la triangulación de los elementos.

```
[X,Y] = meshgrid(xv,yv);  
tri = delaunay(X,Y);  
trimesh(tri,X,Y,zeros(size(X)));  
axis([0,x,0,y]);
```

El comando *meshgrid* requiere los valores del vector que define el rango de coordenadas horizontales *xv* y el rango de coordenadas verticales *yv*.

```
xv = 0:x/ex:x;  
yv = 0:y/ey:y;
```

Finalmente se emplea el comando *trimesh* para graficar el mallado realizado.

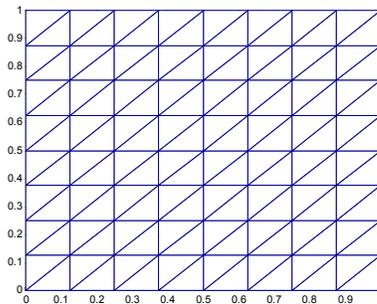


Figura 2.2: Mallado del dominio para una celda electroquímica.

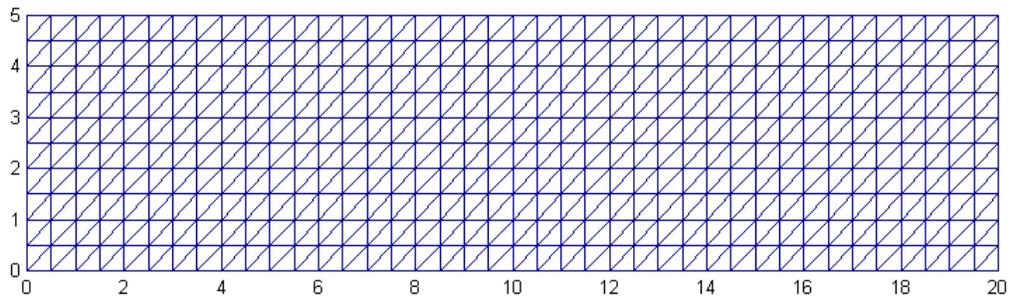


Figura 2.3: Mallado del dominio para zona adyacente a la soldadura.

El mallado de la celda de corrosión está compuesto finalmente por 128 elementos y 81 nodos y la región de soldadura está compuesta por 800 elementos y 369 nodos.

2.3.5. Generación de la matriz de Rigidez.

Para la determinación de la matriz de rigidez de los elementos se creó la subrutina *matrigtr2d*, basada en las ecuaciones 1.19 a 1.22. Esta requiere como valores la conductividad eléctrica k , el espesor t , las matrices de coordenadas X e Y , así como la matriz de nodos de los elementos *tri*.

```
[kk] = matrigtr2d(k,t,X,Y,tri);
```

Esta subrutina determina la hipermatriz kk , en la cual cada capa corresponde a la matriz de rigidez de cada elemento. La matriz de propiedades del material (ecuación 1.22) se determina considerando un material isotrópico ($k_{xx} = k_{yy}$) y el área mediante la expresión 1.12.

Para la generación de la matriz de rigidez global se emplea la subrutina *ensambm*, que requiere la matriz K inicializada previamente, la matriz de rigidez de cada elemento kk y la matriz de elementos *tri*.

```
K = sparse(zeros(nnode,nnode));           %Inicialización de la Matriz Global.
```

```
K = ensambm(K,kk,tri);                   %Matriz de Rigidez Global.
```

La implementación de estos códigos se muestra en los anexos 4 y 5.

2.3.6. Establecimiento de las condiciones de fronteras.

Las condiciones de fronteras que se emplean en el presente caso son del tipo Dirichlet, que se representan para el caso de los problemas de corrosión y electrostáticos, por los valores de los potenciales de corrosión.

Los potenciales de corrosión para cada celda electroquímica, se determinan a partir de curvas de polarización obtenidas experimentalmente mediante ensayos realizados por García y colaboradores (2010).

Tabla 2.5: Voltajes de corrosión de las diferentes zonas de soldaduras.

Fuente: García et al. (2010).

| Electrodo | Vcorr (mV) |
|----------------------------|------------|
| Metal de soldadura | 432 |
| | 453 |
| Zona afectada por el calor | 504 |
| | 518 |
| | 549 |
| Metal base | 526 |
| | 524 |

Teniendo en cuenta que los ensayos electroquímicos se realizan en probetas con dimensiones de 1x1cm, en la simulación se consideran los valores de voltaje en los límites de las celdas de corrosión de iguales dimensiones, considerando la variación en un sentido, desde la zona de fusión hasta el metal base.

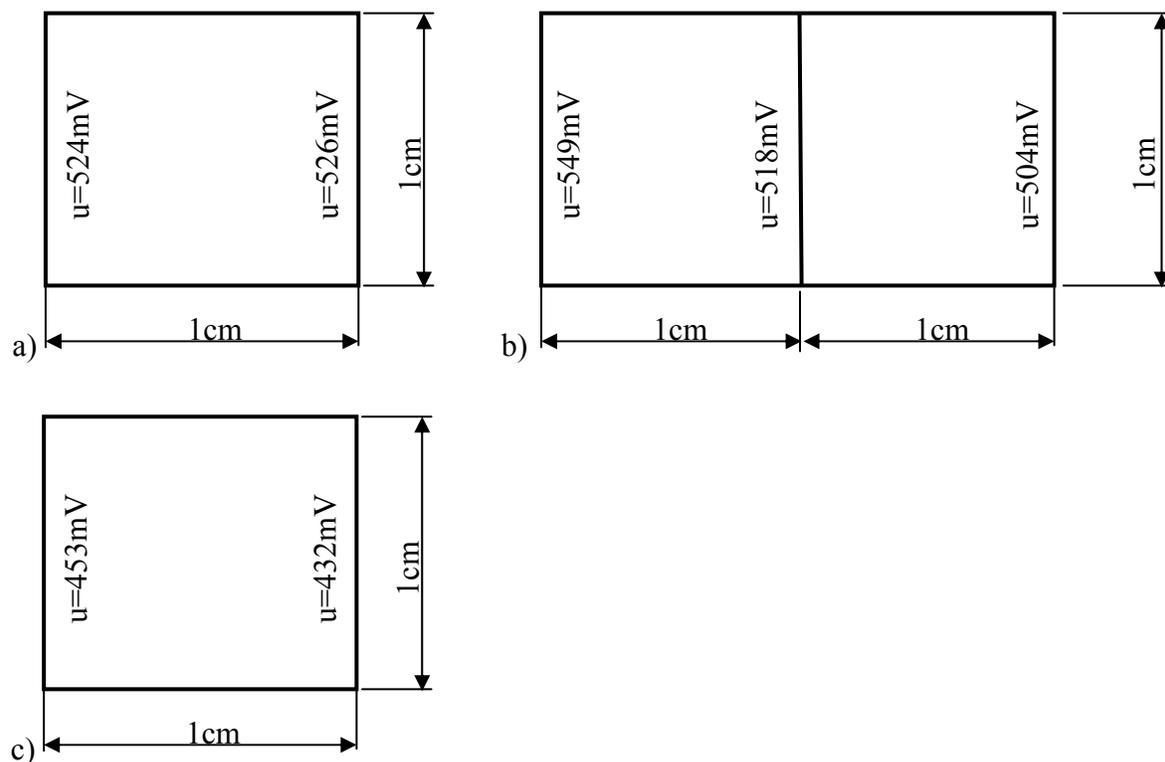
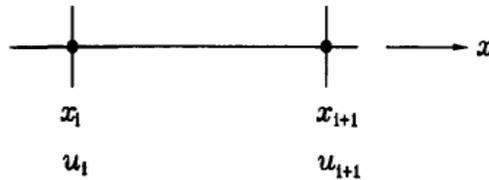


Figura 2.4: Condiciones de fronteras de las celdas de corrosión pertenecientes: a) Metal base, b) Zona afectada por el calor y c) Zona de fusión.

Teniendo en cuenta que el flujo de corriente predominante en el caso de la soldadura es en dirección x , se considera que no existe flujo de corriente en dirección y .

2.3.7. Determinación de los valores de potencial y corriente en el interior del dominio.

Los valores de potencial en el interior del dominio se determinan empleando la formulación de elementos finitos de Galerkin. En este método los elementos son considerados como subdominios en cuyos nodos se determinan los valores de potencial en función de las coordenadas nodales:



$$u_i = c_1 x_i + c_2 \quad 2.1$$

$$u_{i+1} = c_1 x_{i+1} + c_2 \quad 2.2$$

Los coeficientes c_1 y c_2 son determinados a través de los valores de potencial en el contorno:

$$c_1 = \frac{u_{i+1} - u_i}{x_{i+1} - x_i} \quad 2.3$$

$$c_2 = \frac{u_i x_{i+1} - u_{i+1} x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad 2.4$$

El hecho de eliminar la aproximación que representa el mallado de elementos finitos, trae consigo ventajas en cuanto a la exactitud del problema.

La distribución de potencial se determina mediante la función *dpothaz2*:

`ud=dpothaz2(u0,u1,u2,u3,u4,u5,ex,ey,X,xv,yv)`

Esta función requiere como parámetros los valores de los potenciales de oxidación de las zonas próximas a la soldadura, el número de divisiones en x (ex) y en y (ey), el vector de coordenadas X y los vectores de posición en x (xv) y en y (yv).

Para determinar la distribución de la densidad de corriente se creó la función *distcorr*:

```
id=distcorr(ud,k,x,xe,ye)
```

Esta función requiere como parámetros la matriz de potenciales en el interior del dominio (ud), la conductividad eléctrica (k), así como la longitud de los elementos en cada eje (xe y ye).

Para el cálculo de la distribución de corriente previamente se determina el gradiente de potenciales mediante la función *gradient* perteneciente al toolbox de Matlab.

```
[Gx,Gy] = gradient(ud,x,xe,ye);
```

Posteriormente se emplea la expresión 1.24 para determinar el valor de la densidad de corriente. La implementación de estos códigos se encuentra en los anexos 6 y 7.

2.3.8. Obtención de gráficos.

Los resultados significativos de este estudio son la distribución de potenciales y de densidad de corriente en el dominio de estudio, cuyos valores de forma matricial son obtenidos automáticamente por el programa.

Para una mejor interpretación de los resultados, se emplean diagramas de superficie, mediante el comando *contourf*.

```
%Obtención de gráficos.
```

```
subplot(2,1,1)
```

```
contourf(X,Y,ud,ex)
```

```
shading flat
```

```
axis([0 x 0 y]);
```

```
xlabel('Ancho [cm]');
```

```
ylabel('Altura [cm]');
```

```
subplot(2,1,2)
```

```
contourf(X,Y,id,ex)
```

```
shading flat
```

```
axis([0 x 0 y]);
```

```
xlabel('Ancho [cm]');
```

```
ylabel('Altura [cm]');
```

Este comando grafica la variación de potenciales (ud) y el flujo de corriente (id) en función de los vectores de coordenadas nodales X, Y, así como de la cantidad de elementos ex.

2.4. Simulación empleando el Método de Elementos Finitos en ANSYS.

Para demostrar la veracidad de los resultados obtenidos en Matlab, se realiza la comparación con resultados obtenidos por simulación empleando el programa Ansys10.0, en la opción de análisis térmico.

Ambos fenómenos físicos, tanto el térmico como la corrosión son completamente análogos, basados en la ecuación de Laplace. Teniendo en cuenta esto, es posible realizar la simulación de la corrosión, considerando los potenciales de corrosión como temperaturas y el flujo de corriente por el flujo de calor.

2.4.1. Preproceso. Definición del elemento y sus propiedades.

Para la simulación en Ansys se seleccionó el elemento plano Plane55, el cual presenta capacidad de conducción térmica en 2D, tanto en estado estacionario, como transiente.

```
ET,1,PLANE55          ! Element Type: Plane55
```

Este elemento puede realizar mallados rectangulares y triangulares en ambos casos con funciones de forma lineales. En el caso de los elementos rectangulares presentan 4 nodos i, j, k y L, además de un grado de libertad, la temperatura.

Considerándose un material isotrópico, se considera $k_{xx} = k_{yy} = 0.0298 \text{ S/cm}^2$ de acuerdo con las mediciones realizadas. Este valor de conductividad eléctrica es introducido de forma análoga a la conductividad térmica.

```
MP,kxx,1,0.0298      ! Young's modulus
```

Para la construcción del modelo geométrico se emplea el comando de generación de superficies rectangulares “Rectangle”, introduciéndose a través de la opción “by 2 Corners”:

```
Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Rectangle > By 2 Corners
```

```
BLC4, 0, 0, 1, 1      !Para una celda electroquímica.
```

```
BLC4, 0, 0, 5, 2      !Para la zona de influencia térmica.
```

2.4.2. Mallado del dominio.

Manteniendo la discretización de manera similar a la realizada en el script de MATLAB, se le asigna 0.25cm de longitud de los elementos como parámetro para el mallado.

```
AESIZE,ALL,0.25,      ! Element length
```

```
AMESH,ALL              ! Mesh Area
```

Posteriormente se realizó el mallado del dominio completo de la celda.

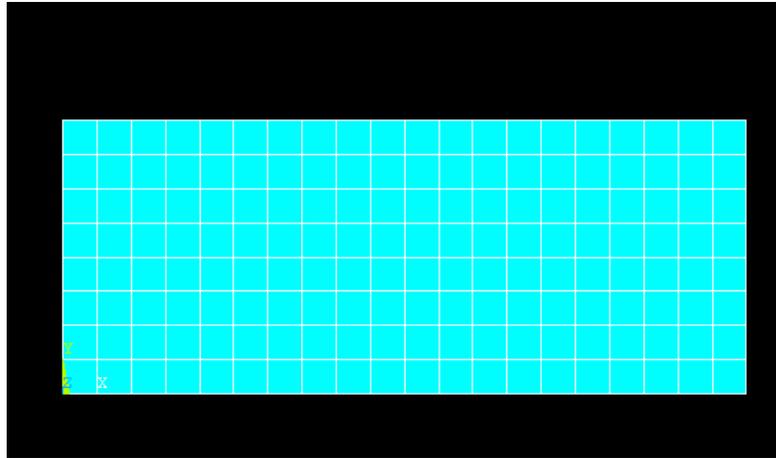


Figura 2.4: Mallado en ANSYS de la zona de influencia térmica.

El mallado de la celda de corrosión y de la zona de influencia térmica quedan compuestos por 16 y 80 elementos respectivamente (figura 2.4).

2.4.3. Establecimiento de las condiciones de frontera.

Al igual que en la subrutina realizado en MATLAB, durante la simulación a través del programa ANSYS se emplearon condiciones de contorno tipo Dirichlet, obtenidas a través de las curvas de polarización del metal.

! Boundary Conditions

DL,18, ,TEMP,432,0

DL,15, ,TEMP,453,0

DL,12, ,TEMP,504,0

DL,9, ,TEMP,518,0

DL,6, ,TEMP,549,0

DL,2, ,TEMP,526,0

DL,4, ,TEMP,524,0

Como se puede observar en los códigos descritos previamente, las condiciones de fronteras fueron aplicadas en líneas en caso del contorno exterior y en nodos para el caso del interior del dominio.

Finalmente se realizó la corrida del programa mediante el comando SOLVE.

2.5. Conclusiones parciales del capítulo.

El presente capítulo ha arrojado las siguientes conclusiones:

1. El agua sedimentada del petróleo posee una alta conductividad eléctrica, un pH ácido y una alta concentración de iones cloruros y sulfatos, factores que influyen notablemente en la velocidad de corrosión.
2. Se implementaron un grupo de funciones programadas en Matlab que podrán ser aplicados a la simulación de problemas de corrosión.

CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

3.1. Introducción al problema de estudio.

En este capítulo se analizará la corrosión presente en el fondo del Tanque No. 28 de la Empresa Comercializadora de Combustibles, por ser esta una de las zonas más atacadas por este fenómeno.

Al realizar una inspección visual, se pudo observar un ataque localizado de la corrosión en zonas próximas al cordón de soldadura que une las planchas que conforman el fondo del tanque, encontrándose puntos con gran profundidad de corrosión y zonas con tendencia al agrietamiento. En las zonas más alejadas del cordón, existe un predominio de la corrosión uniforme, aunque se observan zonas con velocidades de corrosión considerables.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente, la simulación se realiza en un dominio rectangular perteneciente a la zona de unión entre dos de las planchas de acero que conforman el fondo del tanque.

3.2. Simulación de la corrosión en zona afectada por el calor de la soldadura.

La simulación de la corrosión en el dominio de estudio (figura 3.1) muestra los valores de potencial más pequeños en la zona más próxima a la soldadura (zona de fusión), lo cual se fundamenta desde el punto de vista teórico por la composición disímil entre el metal base y el metal de aporte. En esta zona existen además incrustaciones de escorias y otros metales que provocan la aparición de microánodos activos. Debido a ello en esta zona se alcanzan los mayores gradientes de voltaje, factor este directamente proporcional a la densidad de corriente.

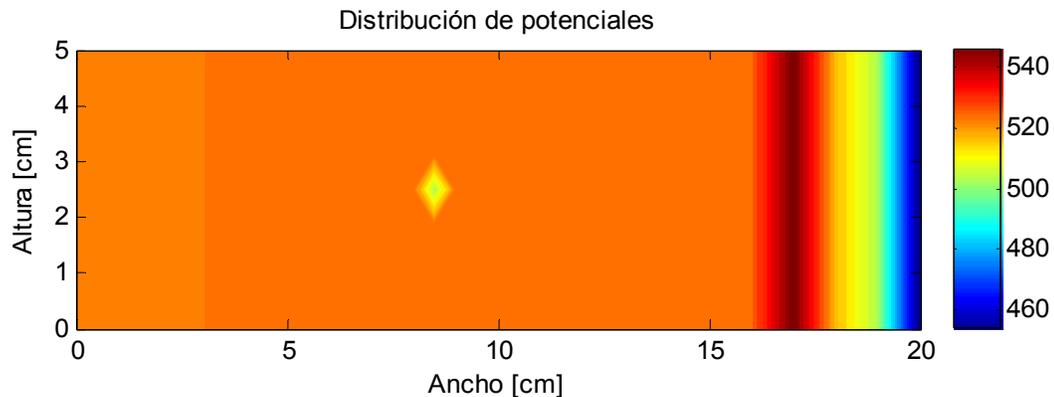


Figura 3.1: Distribución de potencial en zona adyacente a la soldadura y metal base.

La distribución de voltajes mantiene un incremento progresivo a medida que la distancia con respecto a la soldadura se incrementa, alcanzando el valor máximo a una distancia aproximada de 3cm, lo cual hace en este punto el material se comporte como una zona catódica.

El gradiente de potenciales se hace significativo en esta zona hasta una distancia aproximada de 4,25cm, a partir de la cual los valores de potenciales son más uniformes, tendencia que se mantiene en todo el metal base. Esto demuestra que en la superficie del metal base más alejada de la soldadura predomina la corrosión uniforme por encima de la corrosión por picaduras.

En la figura 3.2 puede observarse que los valores mayores de densidad de corriente se encuentran en la zona más próxima a la soldadura, acorde con los valores de gradientes de voltajes obtenidos, lo cual demuestra el comportamiento anódico de esta zona.

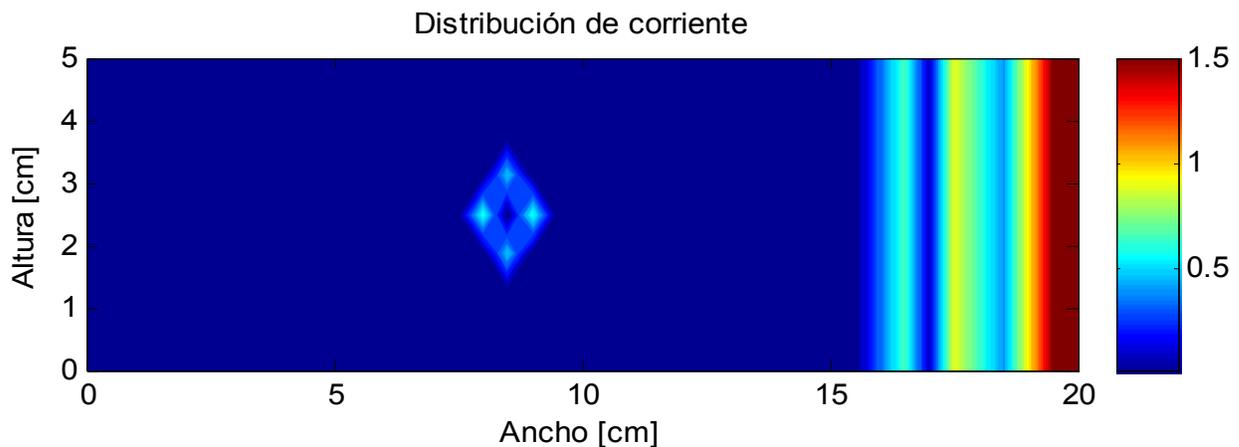


Figura 3.2: Distribución de corriente en zona adyacente a la soldadura y metal base.

En la zona de influencia térmica se obtienen valores de densidad de corriente superiores a los obtenidos en el metal base y a su vez inferiores a los obtenidos en la zona de fusión, lo cual concuerda con lo expresado por Távora y Barbosa (2001) y Vargas (2011).

En las figuras 3.3 y 3.4 se puede observar la variación de potenciales y densidades de corriente obtenidos en las diferentes distancias de la zona de influencia térmica, a través del grupo de funciones programadas en Matlab y del software profesional ANSYS. Los valores numéricos pueden obtenerse en el Anexo No. 12.

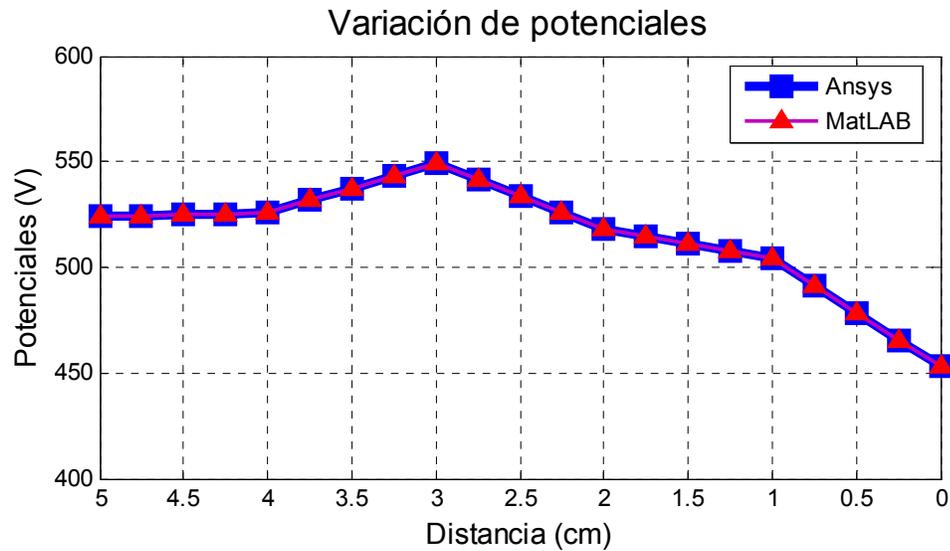


Figura 3.3: Distribución de Voltajes en zona adyacente a la soldadura y metal base.

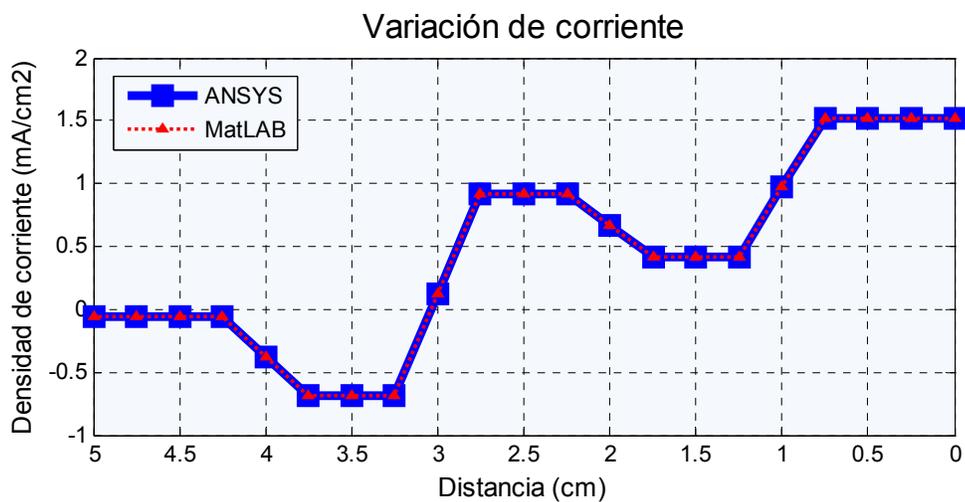


Figura 3.4: Distribución de corriente en zona adyacente a la soldadura y metal base.

Puede observarse que a través del grupo de funciones en MATLAB se obtienen valores de potencial y densidad de corriente exactamente iguales a los obtenidos a través del análisis realizado en ANSYS, lo cual verifica la validez del modelo.

Los resultados muestran un comportamiento anódico de la zona de influencia térmica hasta una distancia de 3,25cm de la soldadura, donde se obtienen los mayores valores de potenciales en la zona catódica e invirtiéndose el sentido del flujo de corriente.

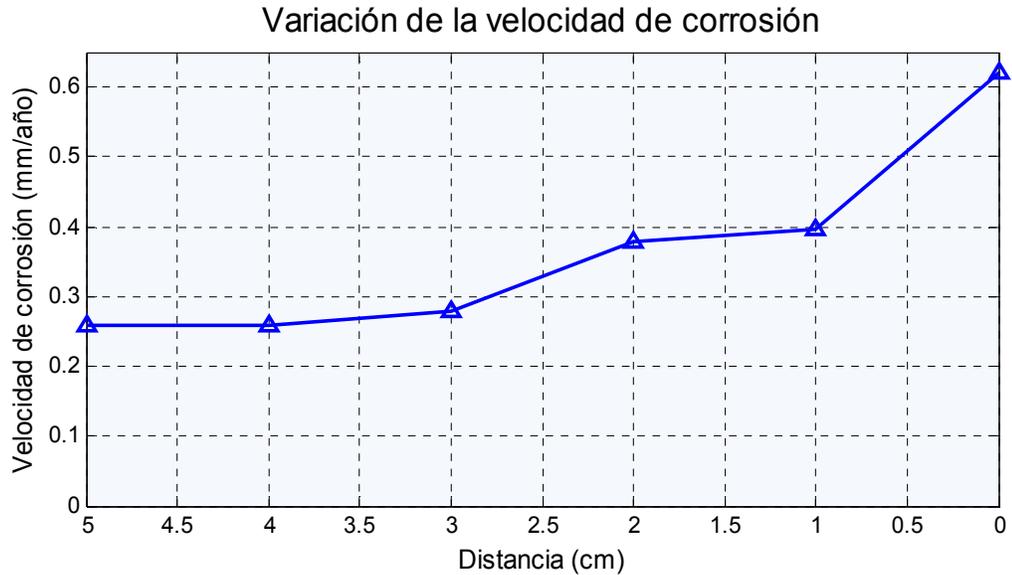


Figura 3.5: Variación de la velocidad de corrosión con la distancia.

En la zona de influencia térmica se obtuvieron valores de pérdida de peso de $0.3110\text{g/cm}^2\text{año}$ y de velocidad de corrosión de 0.3956mm/año , mientras en el metal base estos valores fueron de $0.1883\text{g/cm}^2\text{año}$ y 0.2333mm/año respectivamente, lo cual está acorde con la distribución de potenciales y densidad de corriente obtenidos en estas zonas.

3.3. Validación de los resultados obtenidos.

Para realizar la validación de estos resultados, estos son comparados con valores obtenidos a través de mediciones ultrasónicas en el fondo del tanque, las cuales son mostradas a continuación (tabla 3.1).

Para el estudio de los resultados experimentales obtenidos a través de las mediciones ultrasónicas se realizó un análisis de muestreo simple (Anexo 15), donde se eliminaron del estudio valores inferiores a $5,6\text{mm}$ y superiores a $7,1\text{mm}$, por estar estos fuera del intervalo de confianza y considerarse los mismos errores de mediciones. Posteriormente se repitió este análisis y se verificó que el ajuste realizado siguiera una distribución normal (Anexos 16 y 17).

Tabla 3.1: Valores de velocidad de corrosión en el fondo del tanque obtenidos a través de mediciones ultrasónicas.

| Zona | Velocidad de Corr. (mm/año) | | Error Absoluto | Error Relativo (%) |
|------------|--------------------------------|------|-------------------|--------------------------|
| | MEF | MU | | |
| ZAC | 0,3956 | 0,46 | 0,0644 | 14 |
| MB | 0,2591 | 0,36 | 0,1009 | 28,02 |

En la tabla 3.1 se puede observar que el error relativo entre los valores obtenidos a través de la simulación por elementos finitos y las mediciones ultrasónicas es de 14% para la zona afectada por el calor y de 28,02% para el resto del metal. La diferencia máxima obtenida (error absoluto) es de 0.0644mm/año y 0.1009mm/año respectivamente para ambas zonas.

Esta diferencia entre los valores obtenidos en el interior del metal base se debe a que en este estudio sólo se simula la corrosión electroquímica existente en el fondo del tanque, y no se considera la acción de otros mecanismos, como el caso de la corrosión microbiológica existente en esta zona.

No obstante, estos valores aseguran la validez del modelo obtenido, tomando en consideración que durante la simulación a través de métodos numéricos es aceptable de un 20% a un 30% de error.

3.5. Conclusiones parciales del capítulo.

Luego de concluir este capítulo se han arribado a las siguientes conclusiones:

1. Se realizó la simulación de la corrosión en placas de acero al carbono A-36, mediante un grupo de funciones programadas en Matlab.
2. Se realizó la caracterización de la corrosión en el metal base y en la zona de influencia térmica, obteniendo en este último los valores mayores de densidad de corriente y velocidad de corrosión.
3. Los resultados obtenidos mostraron gran precisión, durante la comparación con el software profesional ANSYS.
4. Aunque existe una diferencia apreciable con respecto a las mediciones ultrasónicas, en este estudio solo se consideró la acción de la corrosión electroquímica, por lo cual se puede decir que los resultados son aceptables.

CONCLUSIONES

1. La consulta bibliográfica realizada permitió establecer los aspectos teóricos necesarios para el desarrollo de este trabajo.
2. Se implementaron un grupo de funciones en MATLAB capaces de predecir la corrosión electroquímica mediante el método de elementos finitos.
3. Los resultados de la simulación en la placa del fondo de los tanques mostraron valores mayores de velocidad de corrosión en la zona de influencia térmica.
4. En el metal base se obtuvieron pequeñas variaciones de potenciales lo que indica el predominio de la corrosión uniforme, mientras en la zona afectada térmicamente se obtuvieron grandes gradientes de voltajes lo que implica la aparición de zonas de corrosión localizadas.
5. La precisión de los resultados obtenidos demuestra la capacidad del método de elementos finitos para predecir el comportamiento del fenómeno corrosión en el fondo de los tanques de petróleo.

RECOMENDACIONES

1. Realizar ensayos electroquímicos que permitan obtener valores de potenciales acorde con las condiciones reales que aparecen en los tanques de petróleo crudo de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas.
2. Realizar estudios de otros fenómenos de corrosión existentes en el fondo de los tanques de petróleo, como el caso de la corrosión microbiológica.
3. Estudiar la influencia de diferentes parámetros (como la composición del petróleo, la temperatura, etc.) en el fenómeno corrosivo existente en el fondo de los tanques de petróleo crudo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adey R.A. y Baynham J. s.f., *Design and Optimisation of Cathodic Protection Systems Using Computer Simulation*. Computational Mechanics BEASY, Hampshire, Reino Unido.
2. Amador, J. 2006, *Uso del método de diferencias finitas en la simulación de un sistema de protección catódica*, [Online], Universidad del Valle (México), Disponible en: <<http://www.uvmnet.edu>> [20 de marzo de 2009].
3. Amar H., Braisaz T., Villemin D. y Moreaub B. 2008, *Thiomorpholin-4-ylmethyl-phosphonic acid and morpholin-4-methyl-phosphonic acid as corrosion inhibitors for carbon steel in natural seawater*. Materials Chemistry and Physics, no. 110, pp. 1–6. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
4. Amaya, K. y Aoki, S. 2003, 'Effective boundary element methods in corrosion analysis', *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 7, no. 5, pp. 507-519. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>.
5. Andrade C. y Martínez I. 2010, *Metal Corrosion Rate Determination of Different Solutions and Reinforced Concrete Specimens by Means of a Noncontacting Corrosion Method*. Corrosion, vol. 66, no. 5, pp. 056001-056001-10. Disponible en: <http://dx.doi.org>
6. Aoki, S. y Kishimoto, K. 1991, 'Prediction of galvanic corrosion rates by the boundary element method', *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 15, no. 3-5, pp. 11-22. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>.
7. Aquino J.M., Della Rovere C.A., y Kuri S.E. 2008, *Localized Corrosion Susceptibility of Supermartensitic Stainless Steel in Welded Joints*. Corrosion, vol. 64, no. 1, pp. 35-39. Disponible en: <<http://dx.doi.org>>
8. Arenas-Martínez L.F y García-Cerecero G. 2012, *Hydrogen Sulfide Corrosion of Weld Regions in API X52 Steel*. Ingeniería Investigación y Tecnología, vol. XIII, no. 4, pp. 473-478. Disponible en: <<http://www.doaj.org>>
9. Bilmes P.D., Llorente C.L., Gervasi S.A. y Gassa L.M. 2004, *Efecto de los tratamientos térmicos Post Soldadura sobre la corrosión por picado de depósitos de aceros inoxidables soft martensíticos*. CONGRESO CONAMET/SAM.

10. Butler B., Chopra M. y Kassab A. 2002, *Boundary Element Model for Stress Field – Electrochemical Dissolution Interactions*. University of Central Florida, Orlando, Florida.
11. Castellani, A. y Coronelli, D. 1999, *Beams with corroded reinforcement: Evaluation of the effects of cross-section losses and bond deterioration by finite element analysis*. Structural Faults and Repair, London, Reino Unido.
12. Castorena, J., Pérez, J., Borunda, A., Gaona, C., Torres-Acosta, A., Velázquez, Martínez y Almeraya, F. 2007, '*Finite element modeling of cracking in concrete due to localized corrosion in the reinforcement*', Ingeniería de construcción, vol. 22, no. 1, pp. 35-42. Disponible en: <<http://www.scielo.cl>>.
13. Chalupecký V. y Muntean A. 2012, *Semi-discrete finite difference multiscale scheme for a concrete corrosion model: approximation estimates and convergence*. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, vol. 29, pp. 289-316. Disponible en: <<http://www.arxiv.org>>
14. Chaves I.A. y Melsher R.E. 2011, *Pitting corrosion in pipeline steel weld zones*. Corrosion Science, vol. 53, no. 12, pp. 4026–4032. <<http://www.sciencedirect.com>>
15. Chen L., Tan H., Wang Z., Li J. y Jiang Y. 2012, *Influence of cooling rate on microstructure evolution and pitting corrosion resistance in the simulated heat-affected zone of 2304 duplex stainless steels*. Corrosion Science. Vol. 58, pp. 168–174. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
16. Colectivo de Autores. 2008, *Estudio de la corrosión*, [Online], Fisicanet, Disponible en: <<http://www.fisicanet.com.ar>> [23 de mayo de 2009].
17. Cortés M. T. y Ortiz P. 2004, Corrosión. APUNTES CIENTÍFICOS UNIANDINOS. no. 4, pp. 14-18.
18. Curiel F.F., Garcia R., López V.H. y González J. 2011, *Effect of magnetic field applied during gas metal arc welding on the resistance to localised corrosion of the heat affected zone in AISI 304 stainless steel*. Corrosion Science, vol. 53, no. 7, pp. 2393–2399. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
19. Da Costa H.S., Napoleão I., Vieira J.F. y Ponciano J.A. 2005, *Modeling of corrosion testing of austenitic steels using Continuum Damage Mechanics*. Universidade Federal Fluminense. Brasil.

20. DeGiorgi, V. G. 1992, *Corrosion basics and computer modeling*, [Online], Naval Research Laboratory, Washington (USA) [19 de abril de 2009].
21. Deng B., Wang Z., Jiang Y., Sun T., Xu J. y Li J. 2009, *Effect of thermal cycles on the corrosion and mechanical properties of UNS S31803 duplex stainless steel*. *Corrosion Science*, vol. 51, no. 12, pp. 2969–2975. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
22. Deyab M.A. y Abd El-Rehim S.S. 2007, Inhibitory effect of tungstate, molybdate and nitrite ions on the carbon steel pitting corrosion in alkaline formation water containing Cl⁻ ion. *Revista Electrochimica Acta* No.53, pp.1754–1760. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
23. Dolores M., Bilmes P.D., Llorente C.L. y Gervasi C.A. 2012, Corrosión de la soldadura de un acero inoxidable martensítico mediante una minicelda electroquímica. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.
24. Dorta M., Rosales A., Vidal J., Muñoz P. y Payares M. 2009, Influencia de soldaduras SAW sobre la resistencia a la corrosión de aceros duplex SAF 2205. Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. Volumen S1. pp. 289-296. Disponible en: <<http://www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html>>
25. Durstewitz, C.B., Almeraya-Calderón, F., Nuñez, R., Gaona, C. y Martínez, A. 2005, 'Simulation and Modeling of cathodic protection systems by the finite and the boundary element method', *Portugaliae Electrochimica Acta*, vol. 23, pp. 123-137. Disponible en: <<http://www.scielo.oces.mctes.pt>>.
26. Durstewitz C.B., Nuñez R.E, Castoresna J.H., Almeraya F., Chacón J.G. y Calderón J.A. 2007, *Simulación numérica del comportamiento de sistemas de protección catódica por el Método de Solución Fundamental de estructuras Inmersas en concreto y suelos*. Universidad Autónoma de Sinaloa Los Mochis, México.
27. Fernández A., Chichizola S.E. y Lascalea G.E. 2004, *Simulación de la corrosión atmosférica en diversos metales en presencia de SO₂ como principal poluyente*. Congreso CONAMET/SAM 2004.
28. Fish, J. y Belytschko, T. 2007, *A First Course in Finite Elements*, Northwestern University, USA.

29. Gavrilov S., Vankeerberghena M., Nelissen G. y Deconinck J. 2007, Finite element calculation of crack propagation in type 304 stainless steel in diluted sulphuric acid solutions. *Corrosion Science*, vol. 49, no. 3, pp. 980–999. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
30. García G., Arenas L.F., Gaona C. y Reyes F.A. 2010, Estudio Electroquímico de la Corrosión de la Soldadura GMAW en Tubería Grado API 5L X52 en Ambiente Amargo. *Foro de Ingeniería e Investigación de Materiales*. Vol. 7, pp. 224-229.
31. Geller, Y. A. y Rajshtadt, A. G. 1984, *Ciencia de los materiales (Métodos de análisis, prácticas de laboratorio y problemas)*, Editorial Metalurgia, Moscú.
32. Guedes C., Garbatov Y., Zayed A. y Wang G. 2008, *Corrosion wastage model for ship crude oil tanks*, *Corrosion Science*, Vol. 50, pp. 3095–3106. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/corsci>
33. Hani A.A. and Khairia S.H. 2010, *Influence of Butt Welding Shapes Design on the Microstructure and Stresses of Low Carbon Steel*, *Eng. and Tech. Journal*, vol.28, no.15, pp. 5036-5047.
34. Hutton, D.V. 2004, *Fundamentals of Finite Element Analysis*, McGraw-Hill, New York.
35. Jia J.X., Song G. y Atrens A. 2007, *Boundary Element Method predictions of the influence of the electrolyte on the galvanic corrosion of AZ91D coupled to steel*. School of Engineering, The University of Queensland, St Lucia, Australia.
36. Jiménez, I. 2006, “Pérdida de la resistencia a la corrosión de aceros inoxidables dúplex SAF 2205 envejecidos a 875°C a diferentes periodos de tiempo”.
37. Kalandyk B., StarowiczM., Kawalec M. y Zapala R. 2013, *Influence of the cooling rate on the corrosion resistance of duplex cast steel*. *Metalurgia*, vol. 13, no. 1, pp. 75-78. Disponible en: <<http://www.doaj.org>>
38. Kamaya M. e Itakura M. 2009, *Simulation for intergranular stress corrosion cracking based on a three-dimensional polycrystalline model*. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, no. 3, pp. 386–401. Disponible en: <<http://www.science direct.com>>

39. Katayama H., Noda K., Masuda H., Nagasawa M., Itagaki M. y Watanabe K. 2005, Corrosion simulation of carbon steels in atmospheric environment. *Corrosion Science*. vol. 47, no. 10, pp. 2599–2606. Disponible en: <Disponible en: <http://www.science direct.com>>
40. Kciuk M. y Kurc-Lisiecka A. 2012, *The influence of heat treatment on structure, mechanical properties and corrosion resistance of steel X10CrNi18-8*. *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 55, no. 2, pp. 62-69. Disponible en: <http://www.doaj.org>.
41. Keera S.T. y Deyab M.A. 2005, *Effect of some organic surfactants on the electrochemical behavior of carbon steel in formation water*. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, no. 266, pp. 129–140. Disponible en: Disponible en: <<http://www.science direct.com>>
42. Khethier M., Salman K., Aziz H. 2012, *Influence of the butt joint design of TIG welding on corrosion resistance of low carbon steel*. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, vol. 3, no. 1, pp. 47-55. Disponible en: <<http://www.scihub.org/AJSIR>>
43. Koszewski L. 2001, *Application of the 100 mV Polarization Criterion for Aboveground Storage Tank Bottoms*, *Corrosion* 2001, March 11 – 16. Disponible en: <<http://www.onepetro.org>>
44. Kranc S.C. y Sagües A.A. 2001, Detailed modeling of corrosion macrocells on steel reinforcing in concrete. *Corrosion Science*, vol. 43, pp. 1355-1372. Disponible en: <<http://www.elsevier.com>>
45. Kubik D.A. y Lyublinski E. 2002, *Corrosion Protection of Storage Tanks*, *Corrosion* 2002, April 7 – 11. Disponible en: <<http://www.onepetro.org>>
46. Kumar G. y Buchheit R.G. 2008, *Use of Artificial Neural Network Models to Predict Coated Component Life from Short-Term Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements*. *Corrosion*, vol. 64, no. 3, pp. 241-254.
47. Lan Z., Wang X., Hou B., Wang Z., Song J. y Chen S. 2012, *Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method*. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, vol. 36, no. 5, pp. 903–906. Disponible en: <<http://www.science direct.com>>

48. Lewis R.W., Nithiarasu P. y Seetharamu K.N. 2004, *Fundamental of the Finite Element Method for heat and fluid flow*. John Wiley & Sons Ltd, England.
49. Liu, G.R. y Quek, S.S. 2003, *The finite element method: A Practical Course*, Butterworth-Heinemann, Burlington M.A, (USA).
50. López O. 2009, *Librería de Matlab para la Solución de Problemas de Elasticidad Lineal por el Método de Elementos Finitos*. Tesis Presentada en Opción al Título Académico de Máster en Ingeniería Asistida por Computadora. Matanzas.
51. Machnikova E., Whitmire K.H. y Hackerman N. 2008, Corrosion inhibition of carbon steel in hydrochloric acid by furan derivatives. *Electrochimica Acta*, Vol. 53, pp. 6024–6032.
52. Makkonen P. 1999, *Artificially Intelligent and adaptive Methods for prediction and analysis of superheater fireside corrosion in fluidized bed boilers*. Lappeenranta University of Technology. Tesis de Doctorado. ISBN 951-764-375-6.
53. Malo J.M., Uruchurtu J., Meza B. y López L.F. 2003, *Evaluación de la problemática de corrosión en fondos de tanques de almacenamiento de petróleo crudo*. Boletín IIE, enero-marzo del 2003.
54. Masuda M., Arita M., Ju L.E., Hanada K., Minagawa H. y Kawamata K. 2004, *The Application of FEM to Cathodic Corrosion Protection of Steel Reinforcement in Concrete*. *Materials Transactions*, vol. 45, no. 12, pp. 3349-3355.
55. Mohana K. y Badiea A.M. 2008, *Effect of sodium nitrite–borax blend on the corrosion rate of low carbon steel in industrial water medium*. *Corrosion Science*, Vol. 50, pp. 2939–2947. Disponible en: <http://www.elsevier.com/locate/corsci>.
56. Montoya R., Aperador W. y Bastidas D.M. 2009, *Influence of conductivity on cathodic protection of reinforced alkali-activated slag mortar using the finite element method*. *Corrosion Science*, vol. 51, no. 12, pp. 2857–2862. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com>
57. Moreno E., Uruchurtu J. y Hernández J.A. 2010, *Simulación del comportamiento de la corrosión de patas de torres de líneas de transmisión eléctrica por medio de redes neuronales*. XXV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, pp. 739 – 749.

58. Mouri L., Mabilie I., Fiaud C. y Amouroux J. 2002, *Improvement of the corrosion resistance of a low carbon steel using a two step plasma treatment*, Corrosion Science, Vol. 44, No. 9, pp. 2089–2099. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
59. Napoleão I., Ponciano J.A. y Da Costa H.S. 2007, *Modeling of slow strain rate corrosion testing of austenitic stainless steel through continuum damage mechanics*. Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, pp. 82-95.
60. Naser G., Karney B.W. 2007, *A 2-D transient multicomponent simulation model: Application to pipe wall corrosion*. Journal of Hydro-Environment Research, vol. 1, pp. 56-69. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
62. Nesbitt J.A. 1995, *Numerical modeling of high-temperature corrosion processes*. Chemistry and Materials Science Oxidation of Metals, vol. 44, no. 1-2, pp. 309-338. Disponible en: <<http://www.springer.com>>
63. Ogawa K., Deng D., Kiyoshima S., Yanagida N. y Saito K. 2009, *Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment*. Computational Material Science, vol. 45, no. 4, pp. 1031–1042. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
64. Onishi Y., Takiyasu J., Amaya K., Yakuwa H. y Hayabusa K. 2012, *Numerical method for time-dependent localized corrosion analysis with moving boundaries by combining the finite volume method and voxel method*. Corrosion Science, vol. 63, pp. 210–224. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
65. Osman M.M. y Shalaby M.N. 2002, *Some ethoxylated fatty acids as corrosion inhibitors for low carbon steel in formation water*. Materials Chemistry and Physics, vol. 77, pp. 261–269. <Disponible en: <http://www.elsevier.com>>
66. Paitan A. 2009, Corrosión de metales. Universidad Nacional del Centro de Perú.
67. Quintero M., Cerpa S., Mejias G., León J. B. y Quintero A. 2006, *Soldadura de un acero inoxidable Dúplex 2205 por el proceso de soldadura GTAW*. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, pp 1-3. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>

68. Rafie M., Mohd S.M. e Ibrahim S. 2012, *Bayesian Neural Networks Model for Ionic Conductivity of Nanocomposite Solid Polymer Electrolyte System (PEO - LiCF₃SO₃ – DBP - ZrO₂)*. International Journal of Electrochemical Science, vol. 7, pp. 222 - 233. Disponible en: <<http://www.electrochemsci.org/>>
69. Ramazan K. 2003, *Effect of solidification mode and morphology of the microstructure on the hydrogen content of duplex stainless steel weld metal*. Materials & Design. ELSEVIER, pp. 1-8. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
70. Rao, S. S. 2005, *The Finite Element method in Engineering*, Elsevier Butterworth-Heinemann, University of Miami, Florida, USA.
71. Roberge, P. R. 2000, *Handbook of corrosion engineering*, McGraw-Hill Companies, New York (USA). Disponible en: <<http://qmlib.umcc.cu>>
72. Roylance, D. 2001, *Finite Element analysis*, [Online], Disponible en: <<http://ocw.mit.edu>> [3 de abril de 2009].
73. Saether I. y Sand B. 2009, *FEM simulations of reinforced concrete beams attacked by corrosion*. Northern Research Institute Narvik. Noruega.
74. Sahin M., Bilgic S. y Yilmaz H. 2002, *The inhibition effects of some cyclic nitrogen compounds on the corrosion of the steel in NaCl mediums*. Applied Surface Science, no. 195, pp. 1–7.
75. Scheider I., Pfuff M. y Dietzel W. 2008, *Simulation of hydrogen assisted stress corrosion cracking using the cohesive model*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 75, no. 15, pp. 4283–4291. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
76. Sheiner S.y Hellmich C. 2009, *Finite Volume model for diffusion- and activation-controlled pitting corrosion of stainless steel*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 198, no. 37–40, pp. 2898–2910. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
77. Tan H., Wang Z., Jiang Y., Yang Y., Deng B., Song H. y Li J. 2012, *Influence of welding thermal cycles on microstructure and pitting corrosion resistance of 2304 duplex stainless steels*. Corrosion Science. Vol. 55, pp. 368–377. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>

78. Tang X., Zhang Y., Liu M. y Li Y. 2009, *Boundary Element Method (BEM) Analysis for Galvanic Corrosion of Hot Dip Galvanized Steel Immersed in Seawater*. J. Mater. Sci. Technol., vol. 25, no.2. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com>>
79. Távora S.A. y Barboza J.F. 2001, *Influencia de los cordones de soldadura sobre la resistencia a la corrosión del acero API5LX-52, en agua sedimentada de petróleo*. Jornadas SAM - CONAMET – AAS 2001. pp. 41-50.
80. Terán G., Tovar C., Portocarrero J. y De Sánchez N.A. 2004, *Estudio de la corrosión producida en aceros inoxidable 304 en procesos de soldadura*. Revista Dyna. Vol. 71, No. 144, pp. 61-66.
81. The Ngoc Dao L., The Ngoc Dao V., Kim S.H y Yong K. 2010, *Modeling Steel Corrosion in Concrete Structures - Part 2: A Unified Adaptive Finite Element Model for Simulation of Steel Corrosion*. International journal of Electrochemical Science, vol. 5, pp. 314 - 326. Disponible en: <<http://www.electrochemsci.org>>
82. Uddin F. A., Shigeishi M. y Ohtsu M. 2006, *Fracture Mechanics of Corrosion Cracking in Concrete by Acoustic Emission*. Physics and Astronomy Meccanica, vol. 41, no. 4, pp. 425-442. Disponible en: <<http://www.springer.com>>
83. Uhlig, H. H. 1985, *Corrosion and Corrosion Control, 3rd ed.*, John Wiley and Sons, New York.
84. Uhlig, H. H. 2000, *Uhlig's Corrosion Handbook, 2nd ed.*, John Wiley & Sons, Londres.
85. Vargas B., Solis J., Angeles C., Albiter A. y Hallen J. M. 2011, *Deterioration of the Corrosion Resistance of Welded Joints in API5L X52 Steel Isothermally Aged*, Int. J. Electrochem. Sci., vol. 6, pp. 367 – 378. Disponible en: <<http://www.electrochemsci.org>>
86. Vega M.A. 2006, *Estudio catódico de cinética de corrosión del acero al carbono en fluido geotérmico mediante un electrodo de disco rotatorio*. Revista Ingeniería, vol. 16, no. 2, pp. 17-22.
87. Weck, O. d. 2007, 'Engineering Desing and Rapid Prototyping', in.
88. Wilches, J. 2006, *Corrosión y Medio Ambiente: Una relación simbiótica*, [Online] [20 de abril de 2009].

89. Yamakawa K. y Kajihara K. 2004, *FEM Simulation of freeteing corrosion*. Koyo Engineering Journal, English Edition No. 165E.
90. Zhang Q., Chen Y.G.,Niu L.S. y Shi H.J. 2007, *Progresses in Fracture and Strength of Materials and Structures. Key Engineering Materials*, vol. 353 - 358, pp. 3116-3119. Disponible en: <<http://www.scientific.net>>

ANEXO 1: Nomenclatura empleada.

| | |
|-----------|---|
| u | Potencial en un punto x del dominio (mV) |
| i | Flujo de corriente en un punto x del dominio (mV) |
| d | Densidad del material |
| k | Conductividad eléctrica |
| Q | Carga eléctrica |
| n | Número de electrones transferidos |
| F | Constante de Faraday 96500 Coulomb/mol |
| W | Peso de las sustancias reactivas |
| CR | Velocidad de corrosión (Corrosion rate) |
| HC | Profundidad de la capa corroída (Height corrosión) |
| U_e | Potencial en el elemento |
| U | Vector con las componentes nodales del desplazamiento |
| N | Matriz defunciones de Interpolación |
| A | Área del elemento |
| $[K]$ | Matriz de rigidez |
| $\{u\}$ | Vector de potenciales |
| $\{i\}$ | Vector densidad del flujo de corriente |
| $[B]$ | Matriz de variaciones de forma |
| $[D]$ | Matriz de propiedades del material |
| $Grad(u)$ | Gradiente de voltajes |
| N_1 | Funciones de forma en el nodo 1 |
| u_a | Potencial anódico |
| u_c | Potencial catódico |
| t | Espesor |
| U_d | Distribución de potenciales obtenidos a través del MEF. |
| I_d | Distribución de la densidad de corriente obtenidos a través del MEF |
| DP | Pérdida de peso del material obtenida a través del MEF (g/m ² año) |
| DE | Velocidad de corrosión del material obtenida a través del MEF (mm/año) |

ANEXO 2: Algoritmo implementado en Matlab para la simulación de la corrosión en celdas electroquímicas.

```
%Datos
%-----
x=1;           %Longitud de la placa - x (cm)
y=1;           %Ancho de la placa - y (cm)
t=0.8;         %Espesor de la placa (cm)
uc=526;        %Voltaje catódico en la frontera del dominio (mV)
ua=524;        %Voltaje anódico en la frontera del dominio (mV)
k=0.0298;      %Conductividad eléctrica del electrolito (S/cm)
ex=8;          %Número de divisiones en x.
ey=8;          %Número de divisiones en y.

xe=x/ex;       %Longitud de los elementos en x.
ye=y/ey;       %Longitud de los elementos en y.
nnode=(ex+1).*(ey+1); %Número Total de nodos.
nelem=ex.*ey;  %Número Total de elementos.

%Modelacion del dominio
%-----
G = [0 x x 0 0;0 0 y y 0]; %Matriz de 2xn con las coordenadas de los puntos.
line(G(1,:),G(2,:));      %Unión de los puntos mediante líneas.

%Mallado del dominio.
%-----
xv = 0:x/ex:x;
yv = 0:y/ey:y;
[X,Y] = meshgrid(xv,yv);
tri = delaunay(X,Y);
trimesh(tri,X,Y,zeros(size(X)));
axis([0,x,0,y]);
```

```

%Determinación de la Matrix de Rigidéz.
%-----
[kk] = matrigtr2d(k,t,X,Y,tri);    %Matriz de rigidez de los elementos.
K = sparse(zeros(nnode,nnode));    %Inicialización de la Matriz Global.
K = ensambm(K,kk,tri);            %Matriz de Rigidez Global.

%Inicialización de las matrices de Potencial y Flujo de Corriente.
%-----
u = zeros(nnode,1);
f = zeros(nnode,1);

%Establecimiento de las condiciones de fronteras.
%-----
for I=1:ey
u((ey+1).*I+1)=524;                %V(0,.)=524.
u((ey+1).*I)=526;                  %V(X,.)=526.
End

%Determinación de los valores de potencial en el interior del dominio.
%-----
ud=distpot1(ua,uc,ex,ey,x,y,xv,yv);

%Cálculos del vector corriente.
id=distcorr(ud,k,xe,ye);
disp(id)

%Obtención de gráficos.
subplot(2,1,1)
contourf(X,Y,ud,ex)
shading flat

```

```

axis([0 x 0 y]);
xlabel('Ancho [cm]');
ylabel('Altura [cm]');

subplot(2,1,2)
contourf(X,Y,fd,ex)
shading flat
axis([0 x 0 y]);
xlabel('Ancho [cm]');
ylabel('Altura [cm]');

%-----
%Determinación de los valores de corriente en el interior del dominio.
%-----
f=K*u;

%Ubicación de los valores de corriente en su posición.
for I=1:ey
    fd(1:ex+1,1)=f(1:ex+1);
    fd(1:ex+1,I+1)=f((ex+1)*I+1:(ex+1)*(I+1));
end

```

ANEXO 3: Algoritmo implementado en Matlab para la simulación de la corrosión en zona de influencia térmica.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Simulación de problemas de corrosión electroquímica en placas          %
% empleando la ecuación de La Place.                                     %
% Ejemplo 1: Dominio rectangular de dimensiones 20x5.                  %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Simulación de la corrosión zona influencia térmica

%Condiciones de frontera

%-----

%Ecuación dominante:  $u_{xx}'+u_{yy}'=0$  (Laplace)

%Dimensiones de la zona de influencia Termica: 5x5cm

%Valores de los potenciales:

%u(0,:)=524mV,
%u(1,:)=526mV,
%u(2,:)=549mV,
%u(3,:)=518mV,
%u(4,:)=504mV,
%u(5,:)=453mV,
% $0 < x < 5, 0 < y < 5$ .

%-----

%Datos
%-----

%Propiedades geométricas del dominio
x=20;           %Longitud de la placa - x (cm)
y=5;           %Ancho de la placa - y (cm)
t=0.8;         %Espesor de la placa (cm)

%Propiedades de los materiales.
u0=453;        %Voltaje en zona de fusión (mV)
```

```

u1=504;          %Voltaje a 1cm de sold (mV)
u2=518;          %Voltaje a 2cm de sold (mV)
u3=549;          %Voltaje a 3cm de sold (mV)
u4=526;          %Voltaje a 4cm de sold (mV)
u5=524;          %Voltaje a 5cm de sold (mV)
d=7.86;          %Densidad del material.
ne=2;            %Número de electrones transferidos.
F=96500;         %Constante de Faraday (F=96500coulomb/equiv.)
k=0.0298;        %Conductividad electrica del electrolito (S/cm)

```

```

%Datos para el mallado.

```

```

ex=40;           %Número de divisiones en x.
ey=10;           %Número de divisiones en y.

```

```

%Determinación de propiedades del mallado.

```

```

xe=x/ex;         %Longitud de los elementos en x.
ye=y/ey;         %Longitud de los elementos en y.
nnode=(ex+1).*(ey+1); %Número Total de nodos.
nelem=ex.*ey;    %Número Total de elementos.

```

```

%Geometría de la placa

```

```

%-----
D = [0 x x 0 0;0 0 y y 0];
line(D(1,:),D(2,:));
xv = 0:x/ex:x;
yv = 0:y/ey:y;
G=zeros(2,size(xv,2));
G(1,1:size(xv,2))=xv;
G(2,1:size(yv,2))=yv;

```

```

%Mallado del dominio.
%-----
[X,Y] = meshgrid(xv,yv);
tri = delaunay(X,Y);
trimesh(tri,X,Y,zeros(size(X)));
axis([0,x,0,y]);

%Determinación de la Matrix de Rigidéz.
%-----
[kk] = matrigtr2d(k,t,X,Y,tri);    %Matriz de rigidez de los elementos.
K = sparse(zeros(nnode,nnode));    %Inicialización de la Matriz Global.
K = ensambm(K,kk,tri);            %Matriz de Rigidez Global.

%Inicialización de las matrices de Potencial y Flujo de Corriente.
%-----
u = zeros(nnode,1);
f = zeros(nnode,1);

%Establecimiento de las condiciones de fronteras.
%-----
u(1:ey+1)=u5;
u(12*(ey+1)+1:5*(ey+1))=u4;
u(14*(ey+1)+1:9*(ey+1))=u3;
u(16*(ey+1)+1:13*(ey+1))=u2;
u(18*(ey+1)+1:17*(ey+1))=u1;
u(20*(ey+1)+1:21*(ey+1))=u0;

%Solución.
%Determinación de los valores de potencial en el interior del dominio.
%-----
ud=dpothaz2(u0,u1,u2,u3,u4,u5,ex,ey,X,xv,yv)
ud(5,18)=503.9;
for I=1:ex
    uf(1:ey+1)=ud(1:ey+1,1);

```

```

    uf((ey+1)*I+1:(ey+1)*(I+1))=ud(1:ey+1,I+1);
end
u=uf';
%Determinación de los valores de corriente en el interior del dominio.
%-----
f=K*u;
%Cálculos del vector corriente.
id=distcorr(ud,k,xe,ye);
disp(id)

%Obtención de gráficos.
subplot(2,1,1)
contourf(X,Y,ud,ex)
shading flat
axis([0 x 0 y]);
title('Distribución de potenciales');
xlabel('Ancho [cm]');
ylabel('Altura [cm]');
colorbar;

subplot(2,1,2)
contourf(X,Y,id,ex)
shading flat
title('Distribución de corriente');
axis([0 x 0 y]);
xlabel('Ancho [cm]');
ylabel('Altura [cm]');
colorbar;

%-----

%Cálculo de la velocidad de corrosión.
%-----

icorr=max(max(id));          %Corriente de corrosión mA/cm2)

```


ANEXO 4: Función para generar la matriz de rigidez de los elementos.

function kk=matrigtr2d(k,t,X,Y,tri)

```
%-----  
% Propósito:  
%   Computar la matriz de rigidéz de los elementos  
%  
% Requiere:  
%   k - Conductividad eléctrica del electrolito  
%   t - Espesor de la placa  
%   X - Matriz de coordenadas en x de los puntos nodales  
%   Y - Matriz de coordenadas en y de los puntos nodales  
%   tri - Matriz de elementos  
%-----  
  
for I = 1:size(tri,1)  
    betai(I) = Y(tri(I,2)) - Y(tri(I,3));  
    betaj(I) = Y(tri(I,3)) - Y(tri(I,1));  
    betam(I) = Y(tri(I,1)) - Y(tri(I,2));  
    gammai(I) = X(tri(I,3)) - X(tri(I,2));  
    gammaj(I) = X(tri(I,1)) - X(tri(I,3));  
    gammam(I) = X(tri(I,2)) - X(tri(I,1));  
  
    A(I) = (X(tri(I,2))*Y(tri(I,3)) + X(tri(I,3))*Y(tri(I,1)) + X(tri(I,1))*Y(tri(I,2)) -  
X(tri(I,2))*Y(tri(I,1)) - X(tri(I,3))*Y(tri(I,2)) - X(tri(I,1))*Y(tri(I,3)))/2;  
    B(:, :, I)=[betai(I) betaj(I) betam(I); gammai(I) gammaj(I) gammam(I)]./(2.*A(I));  
    D=[k 0;0 k];  
    kk(:, :, I) = t.*A(I).*(B(:, :, I)'+D*B(:, :, I));  
end
```

ANEXO 5: Función para generar la matriz de rigidez global.

```
function K=ensambm(K,kk,tri)
%-----
% Propósito:
%   Ensamblar la matriz de rigidez global
%
% Requiere:
%   kk - Matriz de rigidez de los elementos
%   tri - Matriz de elementos
%-----

for I = 1:size(tri,1)
    K(tri(I,1),tri(I,1))=K(tri(I,1),tri(I,1))+kk(1,1,I);
    K(tri(I,1),tri(I,2))=K(tri(I,1),tri(I,2))+kk(1,2,I);
    K(tri(I,1),tri(I,3))=K(tri(I,1),tri(I,3))+kk(1,3,I);
    K(tri(I,2),tri(I,1))=K(tri(I,2),tri(I,1))+kk(2,1,I);
    K(tri(I,2),tri(I,2))=K(tri(I,2),tri(I,2))+kk(2,2,I);
    K(tri(I,2),tri(I,3))=K(tri(I,2),tri(I,3))+kk(2,3,I);
    K(tri(I,3),tri(I,1))=K(tri(I,3),tri(I,1))+kk(3,1,I);
    K(tri(I,3),tri(I,2))=K(tri(I,3),tri(I,2))+kk(3,2,I);
    K(tri(I,3),tri(I,3))=K(tri(I,3),tri(I,3))+kk(3,3,I);
end
```

ANEXO 6: Función para determinar la distribución de potencial en el interior del dominio.

```
function ud=dpothaz2(u0,u1,u2,u3,u4,u5,ex,ey,X,xv,yv)
%-----
%Propósito:
%Determinación de la distribución de potenciales en el interior del dominio.
%
%Requiere:
% ua - Voltaje de corrosión de la zona anódica
% uc - Voltaje de corrosión de la zona catódica
% ex - Número de divisiones en x.
% ey - Número de divisiones en y.
% x - Largo
% y - Ancho
% xv - Vector de coordenadas en x.
% yv - Vector de coordenadas en y.
%-----
R = max(max(X))-4;

for J = 1:R*ex/max(max(X))+1
    C1x=(u4-u5)/(X(1,R*ex/max(max(X))+1)-X(1,1));
    udx(1:ey+1,J)=u5+(C1x.*xv(J));
end

for J = R*ex/max(max(X))+1:(R+1)*(ex/max(max(X)))+1
    C2x=(u3-u4)/(X(1,(R+1)*(ex/max(max(X)))+1)-X(1,R*ex/max(max(X))+1));
    udx(1:ey+1,J)=u4+(C2x.*(xv(J)-xv(R*ex/max(max(X))+1)));
end

for J = (R+1)*(ex/max(max(X)))+1:(R+2)*(ex/max(max(X)))+1
```

```

C3x=(u2-u3)/(X(1,(R+2)*(ex/max(max(X)))+1)-X(1,(R+1)*(ex/max(max(X)))+1));
udx(1:ey+1,J)=u3+(C3x.*(xv(J)-xv((R+1)*(ex/max(max(X)))+1)));
end

for J = (R+2)*(ex/max(max(X)))+1:(R+3)*(ex/max(max(X)))+1
    C4x=(u1-u2)/(X(1,(R+3)*(ex/max(max(X)))+1)-X(1,(R+2)*(ex/max(max(X)))+1));
    udx(1:ey+1,J)=u2+(C4x.*(xv(J)-xv((R+2)*(ex/max(max(X)))+1)));
end

for J = (R+3)*(ex/max(max(X)))+1:ex+1
    C5x=(u0-u1)/(X(1,ex+1)-X(1,(R+3)*(ex/max(max(X)))+1));
    udx(1:ey+1,J)=u1+(C5x.*(xv(J)-xv((R+3)*(ex/max(max(X)))+1)));
end

ud=udx;

```

ANEXO 7: Función para determinar la distribución de densidad de corriente en el interior del dominio.

```
function id=distcorr(ud,k,xo,yo)
```

```
%-----
```

```
%Propósito:
```

```
%Determinación de la distribución de corrientes en el interior del dominio.
```

```
%
```

```
%Requiere:
```

```
% ud - Distribución de Voltajes en el dominio
```

```
% xo - Longitud en x de los elementos.
```

```
% yo - Longitud en y de los elementos.
```

```
%-----
```

```
[Gx,Gy] = gradient(ud,xo,yo);
```

```
ix=k.*Gx;
```

```
iy=k.*Gy;
```

```
id=sqrt(ix.^2+iy.^2);
```

ANEXO 8: Relación de comandos en ANSYS para la simulación de la corrosión en la zona de influencia térmica utilizando de forma análoga el análisis térmico.

```
/clear
```

```
keyw,pr_Therm,1
```

```
! /COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
```

```
! /COM, Thermal
```

```
/TITLE,ZITCORR
```

```
/PREP7
```

```
ET,1,PLANE55           ! Element Type: Plane55
```

```
MP,kxx,1,0.0298       ! Young's modulus
```

```
! Create Geometry
```

```
k,1,0,0,0
```

```
k,2,1,0,0
```

```
k,3,2,0,0
```

```
k,4,3,0,0
```

```
k,5,4,0,0
```

```
k,6,5,0,0
```

```
K,7,6,0,0
```

```
k,8,6,2,0
```

```
k,9,5,2,0
```

```
k,10,4,2,0
```

```
k,11,3,2,0
```

```
k,12,2,2,0
```

```
k,13,1,2,0
```

```
k,14,0,2,0
```

! Create areas

A,1,1,2,13,14

A,2,2,3,12,13

A,3,3,4,11,12

A,4,4,5,10,11

A,5,5,6,9,10

A,6,6,7,8,9

! Mesh

AESIZE,ALL,0.25,

! Element length

AMESH,ALL

! Mesh Area

FINISH

/SOL

ANTYPE,0

! Steady-state

! Boundary Conditions

DL,18, ,TEMP,432,0

DL,15, ,TEMP,453,0

DL,12, ,TEMP,504,0

DL,9, ,TEMP,518,0

DL,6, ,TEMP,549,0

DL,2, ,TEMP,526,0

DL,4, ,TEMP,524,0

SOLVE

ANEXO 9: Valores de espesores medidos en el fondo del tanque y velocidad de corrosión correspondiente.

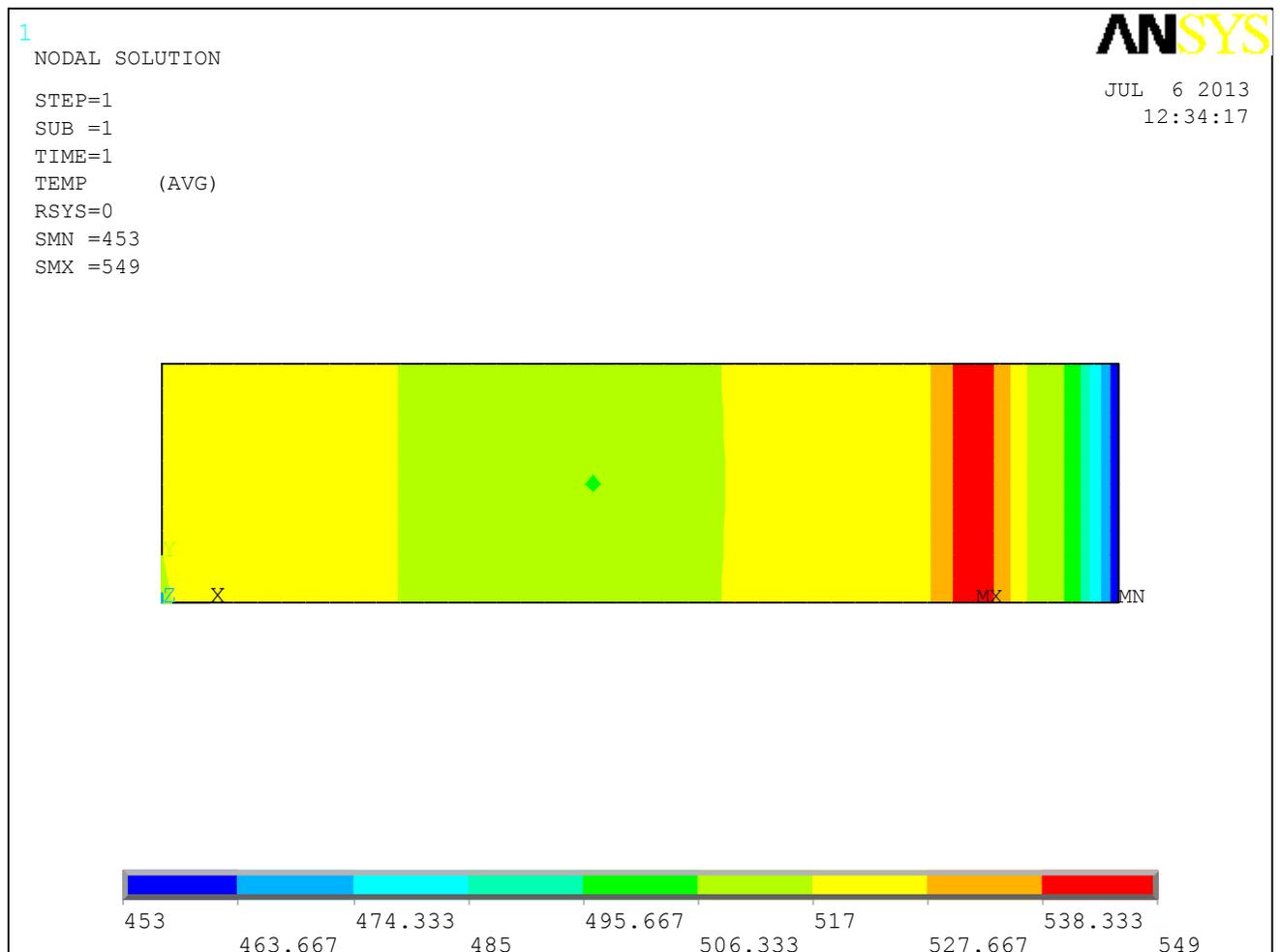
| Placa No. | E1 | E2 | E3 | E4 | C | Placa No. | E1 | E2 | E3 | E4 | C |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 6,4 | 6,2 | 6,5 | 6,8 | 6,9 | 26 | 6,1 | 6,3 | 6,3 | 5,3 | 6,4 |
| 2 | 5,8 | 6,1 | 6,4 | 6,1 | 6,4 | 27 | 6,5 | 6,2 | 7,1 | 4 | 6,4 |
| 3 | 5,8 | 6,3 | 6,3 | 4,4 | 6,1 | 28 | 3,9 | 3,3 | 3,1 | 2,9 | 4,3 |
| 4 | 6,2 | 5,3 | 6,2 | 6,3 | 6,9 | 29 | 5,4 | 5,7 | 6,4 | 6 | 6,5 |
| 5 | 6,4 | 6,1 | 6,4 | 6,7 | 6,3 | 30 | 6,1 | 6,3 | 6,3 | 6,1 | 6,4 |
| 6 | 6,4 | 6,7 | 6,4 | 6,3 | 6,9 | 31 | 6 | 6,5 | 6,3 | 6,5 | 6,6 |
| 7 | 3,2 | 6 | 6,5 | 6,3 | 6,2 | 32 | 6,4 | 6,7 | 6,3 | 6,6 | 7,2 |
| 8 | 5,7 | 6,3 | 6,6 | 6,4 | 6,8 | 33 | 5,8 | 6,3 | 5,9 | 6,2 | 6,5 |
| 9 | 4,7 | 6,2 | 5,7 | 6,2 | 6,4 | 34 | 6,4 | 5,6 | 7 | 6,1 | 6,4 |
| 10 | 6,4 | 4,2 | 6,4 | 4,6 | 6,8 | 35 | 3,9 | 3,1 | 3,4 | 3,3 | 4,7 |
| 11 | 6,8 | 5,5 | 3,7 | 6,1 | 6,6 | 36 | 6,2 | 5,4 | 6,5 | 5,8 | 6,6 |
| 12 | 6,7 | 6,7 | 6,4 | 6,3 | 6,5 | 37 | 6,4 | 6,2 | 6,2 | 6,6 | 6,7 |
| 13 | 5,7 | 6,4 | 5,7 | 6,1 | 6,4 | 38 | 6,1 | 6,6 | 6,2 | 6,5 | 6,7 |
| 14 | 6,4 | 5,6 | 5,6 | 6,1 | 6,3 | 39 | 6,5 | 6,8 | 6,3 | 6,1 | 6,6 |
| 15 | 6 | 6,1 | 6 | 6,3 | 6,6 | 40 | 6,1 | 5,9 | 6,2 | 6,1 | 6,4 |
| 16 | 6,2 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 6,5 | 41 | 3,1 | 3,3 | 3,3 | 3,4 | 4,2 |
| 17 | 5,9 | 5,6 | 6,2 | 5,9 | 6,4 | 42 | 6,2 | 5,7 | 6 | 5,9 | 5,6 |
| 18 | 6,1 | 5,9 | 5,8 | 6,2 | 6,8 | 43 | 6,3 | 6,6 | 6,4 | 6,6 | 6,6 |
| 19 | 6,6 | 6,5 | 6,3 | 6,4 | 6,1 | 44 | 6,3 | 6,7 | 6,1 | 6,5 | 6,5 |
| 20 | 6,3 | 6,4 | 6,3 | 6,2 | 6,1 | 45 | 6,8 | 7,1 | 6,7 | 7,4 | 7,4 |
| 21 | 5,8 | 6,2 | 5,7 | 6,4 | 6,3 | 46 | 7 | 5,9 | 6,8 | 5,9 | 6,1 |
| 22 | 6,4 | 5,9 | 6,4 | 6,6 | 6,1 | 47 | 6,5 | 6,3 | 6,2 | 6,3 | 6,6 |
| 23 | 3,1 | 6 | 3,9 | 5,9 | 6,2 | 48 | 3,4 | 3,3 | 3,9 | 3,5 | 4,5 |
| 24 | 5,9 | 6,6 | 5,9 | 6,3 | 6,5 | 49 | 6 | 5,5 | 6,1 | 6,2 | 6,4 |
| 25 | 6,5 | 6,2 | 6,3 | 6,1 | 6,7 | | | | | | |

Nota del Autor: Los valores señalizados con fondo Amarillo, están fuera del intervalo de confianza de las mediciones, determinados a través de un análisis de muestreo simple en Statgraphics.

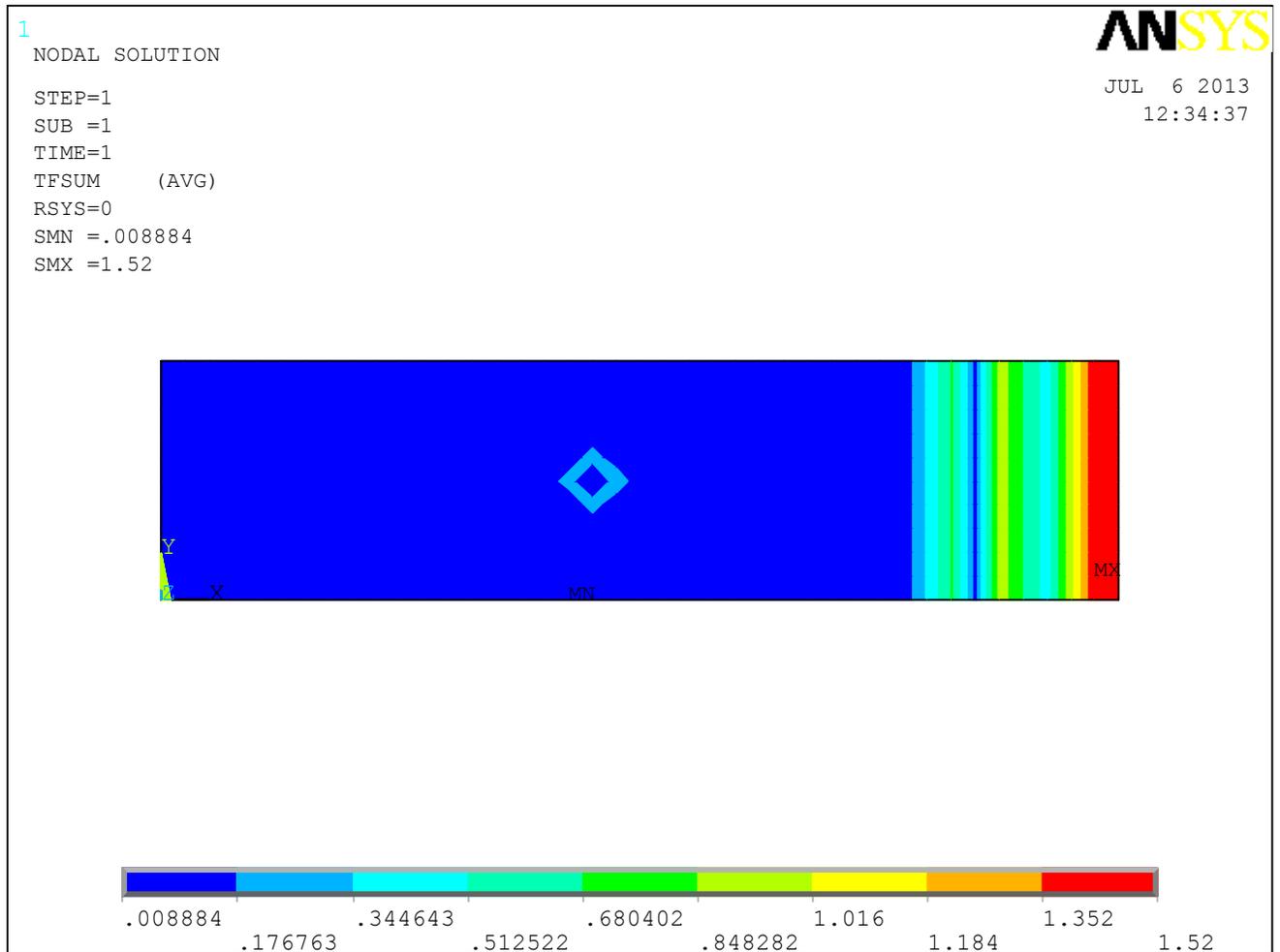
ANEXO 12: Valores de potencial y densidad de corriente obtenidos por subrutinas programadas en Matlab y software profesional ANSYS.

| Distancia (mm) | MATLAB | | ANSYS | |
|----------------|----------------|---|----------------|---|
| | Potencial (mV) | Densidad de Corriente (mA/cm ²) | Potencial (mV) | Densidad de Corriente (mA/cm ²) |
| 0 | 453,00 | 1,5198 | 453,00 | 1,5198 |
| 0,25 | 465,75 | 1,5198 | 465,75 | 1,5198 |
| 0,5 | 478,50 | 1,5198 | 478,50 | 1,5198 |
| 0,75 | 491,25 | 1,5198 | 491,25 | 1,5198 |
| 1 | 504,00 | 0,9685 | 504,00 | 0,9685 |
| 1,25 | 507,50 | 0,4172 | 507,50 | 0,4172 |
| 1,5 | 511,00 | 0,4172 | 511,00 | 0,4172 |
| 1,75 | 514,50 | 0,4172 | 514,50 | 0,4172 |
| 2 | 518,00 | 0,6705 | 518,00 | 0,6705 |
| 2,25 | 525,75 | 0,9238 | 525,75 | 0,9238 |
| 2,5 | 533,50 | 0,9238 | 533,50 | 0,9238 |
| 2,75 | 541,25 | 0,9238 | 541,25 | 0,9238 |
| 3 | 549,00 | 0,1192 | 549,00 | 0,1192 |
| 3,25 | 543,25 | -0,6854 | 543,25 | -0,6854 |
| 3,5 | 537,50 | -0,6854 | 537,50 | -0,6854 |
| 3,75 | 531,75 | -0,6854 | 531,75 | -0,6854 |
| 4 | 526,00 | -0,3725 | 526,00 | -0,3725 |
| 4,25 | 525,50 | -0,0596 | 525,50 | -0,0596 |
| 4,5 | 525,00 | -0,0596 | 525,00 | -0,0596 |
| 4,75 | 524,50 | -0,0596 | 524,50 | -0,0596 |
| 5 | 524,00 | -0,0596 | 524,00 | -0,0596 |

ANEXO 13: Gráfico de distribución de potenciales obtenido a través del software profesional ANSYS.

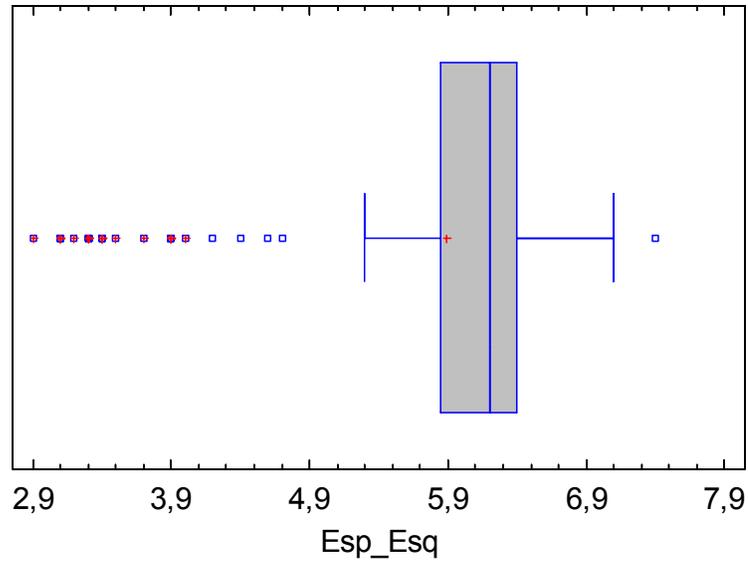


ANEXO 14: Gráfico de distribución de densidad de corriente obtenido a través del software profesional ANSYS.

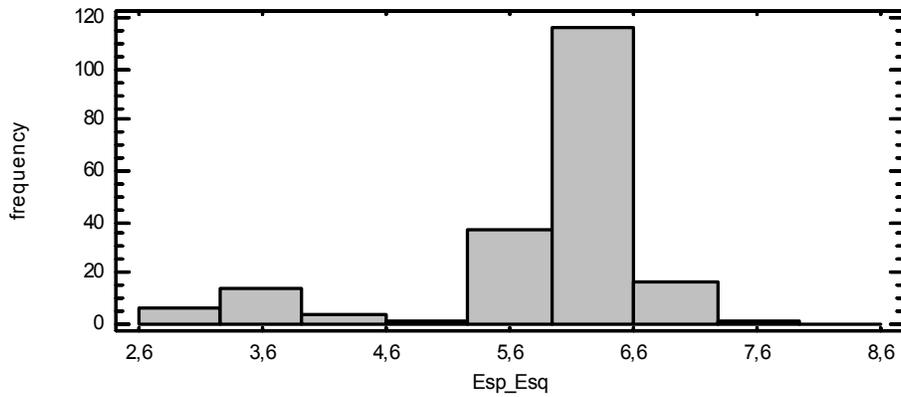


ANEXO 15: Análisis de muestreo simple para eliminar valores extraños.

Box-and-Whisker Plot



Histogram

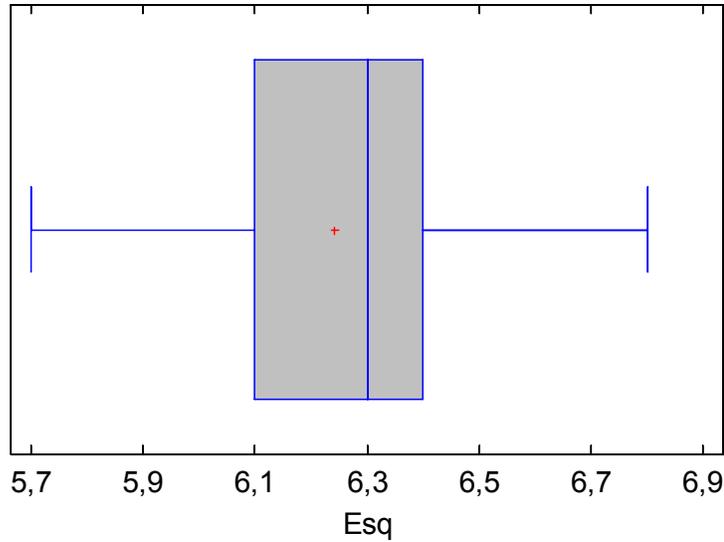


Summary Statistics for Esp_Esq

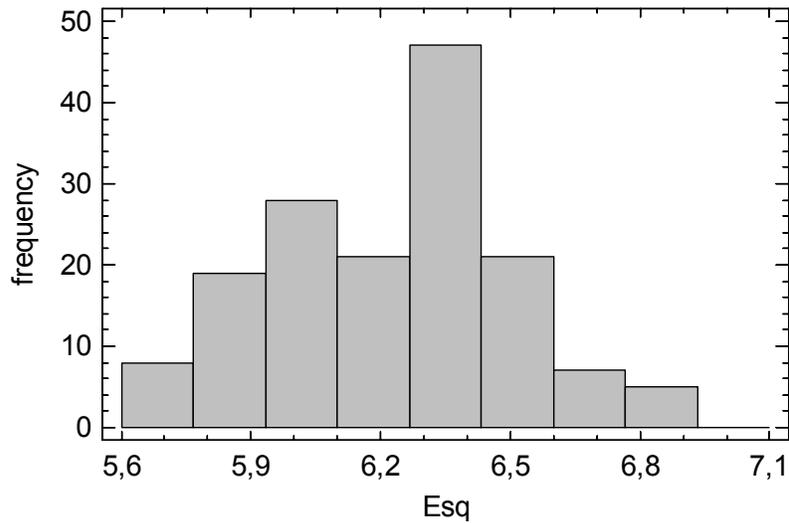
| | |
|---------------------|----------|
| Count | 196 |
| Average | 5,88878 |
| Standard deviation | 0,955457 |
| Coeff. of variation | 16,2251% |
| Minimum | 2,9 |
| Maximum | 7,4 |
| Range | 4,5 |
| Std. skewness | -10,6025 |
| Std. kurtosis | 7,40047 |

ANEXO 16: Análisis de muestreo simple después de eliminar valores extraños.

Box-and-Whisker Plot



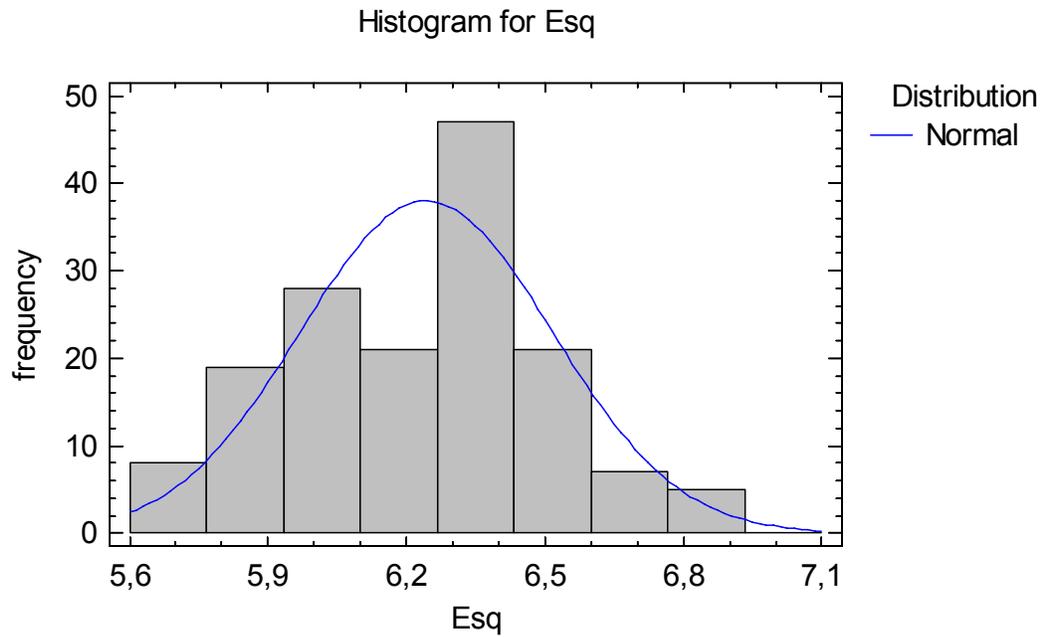
Histogram



Summary Statistics for Esq

| | |
|---------------------|-----------|
| Count | 156 |
| Average | 6,24295 |
| Standard deviation | 0,273121 |
| Coeff. of variation | 4,37487% |
| Minimum | 5,7 |
| Maximum | 6,8 |
| Range | 1,1 |
| Std. skewness | -0,433629 |
| Std. kurtosis | -1,21855 |

ANEXO 17: Análisis de ajuste a distribución normal.



156 values ranging from 5,7 to 6,8
Fitted Distributions

| |
|-------------------------------|
| <i>Normal</i> |
| mean = 6,24295 |
| standard deviation = 0,273121 |

Goodness-of-Fit Tests for Esq

Kolmogorov-Smirnov Test

| | <i>Normal</i> |
|---------|---------------|
| DPLUS | 0,0710975 |
| DMINUS | 0,0955543 |
| DN | 0,0955543 |
| P-Value | 0,115844 |

The StatAdvisor

This pane shows the results of tests run to determine whether Esq can be adequately modeled by a normal distribution.

Since the smallest P-value amongst the tests performed is greater than or equal to 0,05, we can not reject the idea that Esq comes from a normal distribution with 95% confidence.