

**EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION-EROSION EN UN ACERO  
API 5L GRADO 65 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO<sub>2</sub>-SIO<sub>2</sub>-ACEITE MINERAL,  
POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.**

**HECTOR LUIS MUÑOZ FERNANDEZ**

**LUIS ANGEL GONZALEZ MENDOZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2008**

**EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION-EROSION EN UN ACERO  
API 5L GRADO 65 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO<sub>2</sub>-SIO<sub>2</sub>-ACEITE MINERAL,  
POR MEDIO DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.**

**HECTOR LUIS MUÑOZ FERNANDEZ**

**LUIS ANGEL GONZALEZ MENDOZA**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al titulo de:  
Ingeniero Metalúrgico**

**Director:**

**DARIO YESID PEÑA BALLESTEROS  
Ing. Metalúrgico M.Sc. Ph.D**

**Codirector:**

**YESID ORLANDO GARCIA PORTILLA  
Ing. Metalúrgico M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2008**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la inteligencia y enseñarme el camino correcto. A mis padres Hernán y Letty por su incansable trabajo para darme todo. A mis hermanas, abuelos, tíos, primos y a todas las personas que aportaron su granito de arena para poder alcanzar este gran triunfo.

**HECTOR LUIS MUÑOZ FERNANDEZ**

## **DEDICATORIA**

Doy gracias a dios por permitirme llegar a la cima de esta meta, a mis padres por ayudarme e impulsarme para no decaer y hacer de un sueño una realidad, a mis hermanos, profesores y amigos que con su apoyo me permitieron culminar con éxito este logro para mi vida.

**LUIS ANGEL GONZALEZ MENDOZA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al doctor Darío Yesid Peña Ballesteros, al profesor Custodio Vásquez Quintero y al grupo de investigaciones en corrosión, por que con su apoyo fue posible la culminación en feliz termino de este trabajo de investigación.

## CONTENIDO

|   | Pág. |
|---|------|
| INTRODUCCION  | 16   |
| 1. OBJETIVOS.   | 17   |
| 1.1 OBJETIVOS GENERALES.                                  | 17   |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.                                | 17   |
| 2. MARCO TEORICO  | 18   |
| 2.1 CORROSION EROSION EN SISTEMAS MULTIFASICOS            | 18   |
| 2.2 CORROSION POR CO <sub>2</sub>                         | 18   |
| 2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSION POR CO <sub>2</sub> | 19   |
| 2.3.1 Humedad   | 19   |
| 2.3.2 Temperatura   | 19   |
| 2.3.3 Presión parcial de CO <sub>2</sub>                  | 20   |
| 2.3.4 Velocidad del fluido                                | 21   |
| 2.3.5 pH  | 23   |
| 2.3.6 Formación de capas                                  | 23   |
| 2.3.7 presencia de partículas                             | 24   |
| 2.4 EROSION   | 24   |
| 2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSION                       | 25   |
| 2.5.1 Velocidad de las partículas                         | 25   |
| 2.5.2 Morfología de las partículas                        | 26   |

|  |    |
|--|----|
| 2.5.3 Angulo de impacto  | 26 |
| 2.5.4 Tamaño de partículas   | 26 |
| 2.5.5 Dureza superficial   | 27 |
| 2.6 CORROSION-EROSION  | 27 |
| 2.6.1 Factores críticos en la corrosión-erosión                              | 27 |
| 2.7 TECNICAS ELECTROQUIMICAS PARA LA EVALUACION DE VELOCIDADES DE CORROSION. | 28 |
| 2.7.1 Curvas de polarización.  | 28 |
| 2.7.2 Resistencia a la polarización.   | 29 |
| 2.7.3 Ensayos con corriente alterna (impedancias).                           | 30 |
| 3. METODOLOGIA.  | 32 |
| 3.1 REVISION BIBLIOGRAFICA.  | 33 |
| 3.2 FABRICACION DE PROBETAS.   | 33 |
| 3.3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO.                                 | 34 |
| 3.4 CARACTERIZACION DE LA ARENA.   | 36 |
| 3.5 EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS EN EL LABORATORIO.                       | 37 |
| 3.6 DESCRIPCION DEL MONTAJE PARA LOS ENSAYOS.                                | 38 |
| 3.7 VARIABLES DEL SISTEMA.   | 39 |
| 3.7.1 Diseño experimental estadístico.                                       | 39 |
| 3.8 DESARROLLO EXPERIMENTAL.   | 40 |
| 3.9 DIAGRAMA DE FLUJO TECNICA DE EXPERIMENTACION.                            | 42 |
| 4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.                                      | 42 |
| 4.1 VELOCIDAD DE CORROSION SIN EROSION (CORROSION PURA).                     | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 VELOCIDAD DE CORROSION-EROSION.  | 46 |
| 4.2.1 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a 1 m/s y 27 °C. | 46 |
| 4.2.2 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a 1 m/s y 55 °C. | 48 |
| 4.2.3 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a 5 m/s y 27 °C. | 51 |
| 4.2.4 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a 5 m/s y 55 °C. | 53 |
| 4.3 ANALISIS ESTADISTICOS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES.   | 55 |
| 4.3.1 Correlación matemática.  | 55 |
| 4.3.2 Análisis de Pareto.  | 56 |
| 4.4 ESFUERZOS DE CORTE.  | 59 |
| 4.5 SUPERFICIE DE LA PROBETA DESPUES DEL ENSAYO.   | 62 |
| 5. CONCLUSIONES.   | 65 |
| 6. RECOMENDACIONES.  | 67 |
| BIBLIOGRAFIA.  | 68 |
| ANEXOS.  | 71 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| Figura 1. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad crítica de flujo. | 22   |
| Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad de flujo.         | 22   |
| Figura 3. Esquema del desgaste por erosión.   | 24   |
| Figura 4. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución.               | 31   |
| Figura 5. Diagrama de impedancia.   | 32   |
| Figura 6. SEM y EDS para la muestra de arena.                                       | 36   |
| Figura 7. Curvas $R_p$ a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.         | 44   |
| Figura 8. Curvas Tafel a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.         | 44   |
| Figura 9. Diagrama de Nyquist a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.  | 45   |
| Figura 10. Resistencia a la polarización a 1 m/s y 27 °C.                           | 47   |
| Figura 11. Diagramas Nyquist a 1 m/s y 27 °C.                                       | 47   |
| Figura 12. Curvas Tafel a 1 m/s y 55 °C.  | 48   |
| Figura 13. Resistencia a la polarización a 1 m/s y 55 °C.                           | 49   |
| Figura 14. Diagramas de Nyquist a 1 m/s y 55 °C.                                    | 49   |
| Figura 15. Curvas Tafel a 1 m/s y 55 °C.  | 50   |
| Figura 16. Resistencia a la polarización a 5 m/s y 27 °C.                           | 51   |
| Figura 17. Diagramas Nyquist a 5 m/s y 27 °C.                                       | 52   |
| Figura 18. Curvas Tafel a 5 m/s y 27 °C.  | 52   |
| Figura 19. Resistencia a la polarización a 5 m/s y 55 °C.                           | 54   |

|  |    |
|--|----|
| Figura 20. Curvas Tafel a 5 m/s y 55 °C.   | 54 |
| Figura 21. Interacciones entre las variables (método de Pareto) sistema Salmuera-aceite mineral-CO <sub>2</sub> sin partículas (corrosión pura).         | 57 |
| Figura 22. Interacciones entre las variables (método de Pareto) sistema Salmuera-aceite mineral-SiO <sub>2</sub> -CO <sub>2</sub> (corrosión – erosión). | 57 |
| Figura 23. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión (corrosión pura).   | 58 |
| Figura 24. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión (corrosión-erosión).  | 58 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pag. |
|--|------|
| Tabla 1. Corrosividad del CO <sub>2</sub> sobre acero al carbono de baja aleación.                                     | 21   |
| Tabla 2. Efecto del pH en la etapa controlante de la corrosión.  | 23   |
| Tabla 3. Composición química del acero API 5L X65.   | 34   |
| Tabla 4. Prueba de dureza del acero API 5L X65.  | 35   |
| Tabla 5. Análisis químico por AAE de la muestra de arena.  | 36   |
| Tabla 6. Variables para el desarrollo del experimento.   | 39   |
| Tabla 7. Matriz para las pruebas de corrosión pura.  | 39   |
| Tabla 8. Matriz para las pruebas de corrosión – erosión.   | 40   |
| Tabla 9. Resultados de la velocidad de corrosión del acero API 5L X65 por las técnicas de corriente directa y alterna. | 46   |
| Tabla 10. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena-aceite mineral a 1 m/s y 27 °C.           | 48   |
| Tabla 11. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena-aceite mineral a 1 m/s y 55 °C.           | 51   |
| Tabla 12. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena-aceite mineral a 5 m/s y 27 °C.           | 53   |
| Tabla 13. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena-aceite mineral a 5 m/s y 55 °C.           | 55   |
| Tabla 14. Datos de viscosidad y densidad a diferentes temperaturas para la muestra salmuera - aceite.                  | 60   |
| Tabla 15. Numero de Reynolds a diferentes temperaturas.  | 60   |
| Tabla 16. Esfuerzos de corte.  | 60   |

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

|  | Pag. |
|--|------|
| Fotografía 1. Probeta de acero API 5L X65.....   | 33   |
| Fotografía 2. Microestructura del acero API 5L X65.....  | 35   |
| Fotografía 3. Electrodo de cilindro rotatorio.....   | 37   |
| Fotografía 4. Controlador de velocidad del cilindro rotatorio y potencióstato galvanostato (GAMRY).....                            | 37   |
| Fotografía 5. Montaje completo para los ensayos y cilindro de gases.....   | 38   |
| Fotografía 6. Superficie de la probeta después del ensayo sin partículas (corrosión pura).....                                     | 62   |
| Fotografía 7. Análisis tridimensional de la superficie del material (corrosión pura).<br>.....                                     | 62   |
| Fotografía 8. Superficie de la probeta después del ensayo con partículas (corrosión – erosión). (a) 25X (b) 50X.....               | 63   |
| Fotografía 9. Análisis tridimensional de la superficie del material (corrosión – erosión). (a) Toma lateral (b) Toma superior..... | 63   |

## LISTA DE ANEXOS

|   | Pag. |
|---|------|
| Anexo A. Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 1 y tamaños de partícula 50.....     | 71   |
| Anexo B. Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 1% y tamaños de partícula 300µm..... | 71   |
| Anexo C. Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 9% y tamaños de partícula 50µm.....  | 72   |
| Anexo D. Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 9% y tamaños de partícula 300µm..... | 72   |
| Anexo E. Gráficos de la interacción para la velocidad de corrosión y probabilidad normal para la velocidad de corrosión.....      | 73   |
| Anexo F. Análisis de varianza para el sistema con partículas (corrosión-erosión).....   | 73   |
| Anexo G. Gráficos de la interacción para la velocidad de corrosión y probabilidad normal para la velocidad de corrosión.....      | 74   |
| Anexo H. Análisis de varianza para el sistema sin partículas (corrosión pura).....  | 74   |

## RESUMEN

**TITULO: EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION-EROSION EN UN ACERO API 5L GRADO 65 EN UN SISTEMA SALMUERA-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-ACEITE MINERAL, POR MEDIO DE TECNICAS ELECTROQUIMICAS\*.**

### AUTORES:

**MUÑOZ FERNANDEZ, Hector Luis.  
GONZALEZ MENDOZA, Luis Ángel\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Corrosión-Erosión, sistema multifásico salmuera-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-aceite mineral, Corrosión por CO<sub>2</sub>, técnicas electroquímicas, electrodo de cilindro rotatorio, erosión.

### DESCRIPCION:

En la producción y transporte de petróleo y gas se presentan muchos problemas de tipo corrosivo donde la erosión- corrosión es uno de los más importantes. La velocidad del fluido y el arrastre de partículas sólidas a través del crudo transportado por las tuberías son factores críticos en el proceso de deterioro de los aceros de bajo carbono en presencia de CO<sub>2</sub>.

Se puede definir la erosión-corrosión como un proceso de degradación combinado que ocurre debido a la acción química o electroquímica, junto con un proceso de remoción mecánica acelerada de la superficie del material como resultado del movimiento relativo de sólidos, líquidos, vapores o cualquier combinación de éstos, las cuales son impactadas sobre la superficie del material en la cual ya está ocurriendo un proceso corrosivo.

Los ensayos se realizaron en una celda de erosión-corrosión donde el sistema dinámico fue controlado por el electrodo de cilindro rotatorio a velocidades entre 1 y 3 m/s, variando el tamaño de partícula entre 50µm y 300µm y la concentración de las mismas entre 1 y 9%. Técnicas de corriente directa y corriente alterna se utilizaron para determinar los valores de velocidad de corrosión, para cada una de las condiciones evaluadas.

Mediante un análisis estadístico se observó que la influencia de las partículas de arena, la velocidad de rotación y su interacción son factores significativos en la velocidad de corrosión del acero. Finalmente, con la variable respuesta, se obtuvo la relación matemática entre la velocidad de corrosión y las variables del sistema.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de fisicoquímicas, escuela de Ingeniería Metalúrgica, Grupo de Investigaciones en Corrosión. Ph.D Dario Yesid Peña Ballesteros.

## ABSTRACT

**TITLE: EROSION-CORROSION EVALUATION OF A STEEL API 5L X65 IN A MULTIPHASE BRINE-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-MINERAL OIL SYSTEM, BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES**

### **AUTHORS:**

**MUÑOZ FERNANDEZ, Héctor Luis.  
GONZALEZ MENDOZA, Luis Ángel\*\***

**KEY WORDS:** Corrosion-Erosion, multiphase system Brine- CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-mineral oil, CO<sub>2</sub> corrosion, electrochemical Techniques, Rotating cylinder electrode, Erosion.

### **DESCRIPTION:**

In the production and transport of petroleum and gas many problems of corrosive type are found, where the erosion - corrosion is one of the most important. The fluid's speed and the haulage of solid particles through the oil transported by pipelines are critical factors in the process of deterioration of the low carbon steels in presence of CO<sub>2</sub>.

Erosion-corrosion is a degradation process that occurs due to the chemical or electrochemical action, along with a process of mechanical removal of the surface of the material as a result of the relative movement of solids, liquids, vapors or any combination of these, which are impacted on the surface of the material in which, a corrosive process is already happening

The tests were carried out in a cell erosion-corrosion where the dynamic system was controlled by RCE with rotational speeds between 1 and 3 m/s, varying the particle size from 50µm to 300µm and its concentration from 1 to 9%. In order to determine the corrosion rate, techniques as polarization resistance, Tafel slopes and electrochemical impedance spectroscopy were carried out.

By means of a statistical analysis, it was observed that the influence of the particles of sand, as well as the rotation velocity and their interaction are significant factors in the corrosion rate of steel. Finally, with the variable answer, a mathematical relationship was obtained between the corrosion rate and the variables system studied in this research.

---

\* Research Work.

\*\* Faculty of Physical Chemistry Engineering. School of Metallurgical Engineering. Group of Corrosion Research Ph.D Darío Yesid Peña B.

## INTRODUCCION

Un estudio profundo de la corrosión de aceros para tubería transportadoras de crudo determina que el  $\text{CO}_2$  es uno de los agentes corrosivos más peligrosos, que bajo la influencia de factores como la velocidad de flujo y presencia de arena activan la velocidad de corrosión del metal ocasionando un deterioro y la destrucción del mismo. La corrosión asistida por erosión es uno de los problemas que a diario se presentan en las industrias petroquímicas, por eso el objetivo de este trabajo de investigación es la evaluación de la velocidad de corrosión mediante ensayos que permitan simular a escalas pequeñas, como es el comportamiento corrosivo del flujo que se transporta en las tuberías que van desde el pozo hasta el tanque de almacenamiento. Se sabe que la erosión es uno de los factores que condicionan la velocidad de corrosión, ya que es la causante del deterioro de la capa protectora interna de la tubería, dejando el espacio para que gases como el  $\text{CO}_2$  incremente la corrosión, que conlleva a una disminución en el espesor de la tubería, y de no ser controlado, la pérdida del material.

El flujo que circula a través de la tubería lleva elementos sólidos como la sílice, gases como el  $\text{CO}_2$ , agua salada que influyen de manera determinante en el deterioro por corrosión de la tubería, por lo tanto se estudiará la influencia de estos elementos, para determinar su efecto sobre un acero API 5L grado 65.

Dentro de los parámetros más importantes se tiene la velocidad de flujo, la temperatura, el porcentaje de sílice, el tamaño de partícula de la sílice, y el porcentaje de aceite. Además se utilizarán las técnicas de EIS, Rp y Tafel que permiten una mayor comprensión de los datos obtenidos en la práctica y así, poder dar unas conclusiones del comportamiento del flujo multifásico.

Por lo tanto se realizará un estudio más detallado del daño que ocasionan estos elementos que son los causantes directos de la corrosión de las tuberías en el transporte de hidrocarburos; de lo contrario repercutirá en paradas no programadas en la producción, cambios constante de materiales, grandes costos de aplicación y contratación de personal que controlen y mitiguen dicha corrosión.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERALES**

Evaluar el comportamiento a la corrosión-erosión de un acero API 5L grado 65 en un sistema compuesto por salmuera-CO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-aceite mineral, por medio de EIS, Rp y Tafel, en un electrodo de cilindro rotatorio.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Determinar la velocidad de corrosión-erosión por medio de las técnicas electroquímicas en el acero API 5L grado 65 expuesto a un medio multifásico que contiene salmuera - CO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> - aceite mineral.

Evaluar la influencia que tienen el tamaño de partícula, la velocidad del fluido y la temperatura sobre la velocidad de corrosión-erosión sobre el acero API 5L grado 65, en un sistema compuesto por salmuera - CO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> - aceite mineral.

## **2. MARCO TEORICO**

### **2.1 CORROSION EROSION EN SISTEMAS MULTIFASICOS**

Se puede definir la corrosión como un proceso de degradación del material que ocurre debido a la acción química o electroquímica, mientras que la erosión es un proceso de remoción mecánica acelerada de la superficie del material como resultado del movimiento relativo de sólidos, líquidos, vapores o cualquier combinación de éstos, los cuales son impactados sobre la superficie del material. Cuando estos dos procesos actúan juntos, el proceso conducente a la degradación del material se conoce como erosión-corrosión<sup>[1,2]</sup>.

La erosión-corrosión puede producir mayores velocidades de penetración en las paredes de las tuberías que la erosión o la corrosión solas. A bajas velocidades de flujo, la capa de óxido formada por la corrosión por CO<sub>2</sub> sirve de protección, causando que la velocidad de corrosión sea baja. A altas velocidades de flujo, las partículas de arena evitan la formación de la capa de óxido, ocasionando una alta velocidad de penetración de la pared debido al impacto de las partículas sobre las paredes de la tubería<sup>[3]</sup>.

### **2.2 CORROSION POR CO<sub>2</sub>**

La corrosión por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) o corrosión dulce, resulta de la reacción de la superficie del acero con ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) que proviene de la solución de CO<sub>2</sub> en una fase acuosa. El CO<sub>2</sub> gaseoso es soluble en agua, pero solamente una pequeña parte de él se hidrata formando ácido carbónico, promoviendo una reacción electroquímica entre el acero y la fase acuosa que lo contiene.

En la producción del petróleo cuando se transporta un fluido con alto contenido de componentes ácidos, tal como el  $\text{CO}_2$ , se presenta corrosión en la tubería que lo transporta, debido a que éste puede reaccionar con el agua presente, formando compuestos altamente corrosivos, por lo tanto se puede afirmar que si no se tiene el suficiente contenido de agua en el flujo para que se produzcan estos compuestos, no se presentará una corrosión significativa en la tubería.

## **2.3 FACTORES QUE AFECTAN LA CORROSION POR $\text{CO}_2$ .**

**2.3.1 Humedad.** Para que exista el proceso corrosivo el agua debe estar presente y humedecer la superficie del acero. La severidad del ataque es proporcional al tiempo durante el cual la superficie del acero está humedecida por la fase acuosa, esta fase puede provenir de la condensación del vapor de agua, o, de las aguas de depósito, salmuera de depósito que se arrastró con el fluido, principalmente hidrocarburo.

**2.3.2 Temperatura.** La temperatura influencia fuertemente la corrosión por  $\text{CO}_2$  debido a su efecto sobre la velocidad de formación de la película. A bajas temperaturas, las velocidades de corrosión aumentan debido a la alta solubilidad de la película de  $\text{FeCO}_3$ . Mientras que si se aumenta la temperatura alrededor de (60-80°C) la capa del carbonato de hierro llega a ser más adherente a la superficie del metal y más protectora por naturaleza dando como resultado una disminución en la velocidad de corrosión. Esta correlación entre la temperatura y la velocidad de corrosión fue divulgada por muchos investigadores, Ueda y colaboradores atribuyen la velocidad máxima de corrosión a una temperatura crítica,  $T_{\text{max}}$ , encontrada en aceros al carbono y al cromo<sup>[4]</sup>.

Los autores De Waard y Williams <sup>[5]</sup> relacionaron la velocidad de corrosión con la temperatura de acuerdo a la relación de Arrhenius, aplicada a una solución con un pH de 4 y un rango de temperatura entre 0 y 80°C.

$$\text{Log } i_c = 7.58 - (10700 / 2.3 R T) \quad (1)$$

Donde:

**$i_c$**  = velocidad de corrosión [mm/y]

**R** = Constante universal de los gases [cal / mol °K]

**T** = Temperatura absoluta [°K]

**2.3.3 Presión parcial de CO<sub>2</sub>.** La presión parcial del dióxido de carbono se puede usar como un criterio para predecir la corrosividad del sistema. En términos generales se puede decir que la velocidad de corrosión se incrementa al aumentar la presión parcial de CO<sub>2</sub>, esto es debido a que al incrementar la presión parcial, se aumenta la disolución en la solución y por tanto, la concentración de especies agresivas se elevan acelerando la velocidad de corrosión, hasta una cierta concentración, luego de la cual se hace constante. Sin embargo hay autores como Anderko <sup>[6]</sup> que indican que un incremento en la presión parcial del CO<sub>2</sub> produce un incremento en la actividad del ión carbónico que favorece la formación de capas protectoras de siderita, y por lo tanto la velocidad de corrosión disminuye (como se puede observar en la tabla 1); en este punto hay que tener en cuenta los factores que determinan la solubilidad del dióxido de carbono que son: la presión, la temperatura y la composición del agua. La solubilidad del dióxido de carbono en agua, se incrementa con el aumento en la presión y su correspondiente disminución de pH; recíprocamente, el incremento en la temperatura disminuye la solubilidad y aumenta el pH. Cuando el agua contiene una gran cantidad de

sólidos disueltos, el efecto de la presión puede ser aliviado y se evita el descenso del pH.

Tabla 1. Corrosividad del CO<sub>2</sub> sobre acero al carbono de baja aleación.

| CONDICIONES                        | CORROSIVIDAD      |
|------------------------------------|-------------------|
| PCO <sub>2</sub> < 0,5 bar         | Muy poco probable |
| 0,5 bar < PCO <sub>2</sub> < 2 bar | Posible           |
| PCO <sub>2</sub> > 2 bar           | Segura            |

Fuente: La corrosión en el campo petrolero.

**2.3.4 Velocidad del fluido.** El flujo afecta la velocidad de disolución del metal de diferentes formas. Por debajo de la intensidad crítica de flujo la velocidad de corrosión aumenta solo gradualmente con el aumento de la intensidad del flujo (figura 1). Por arriba de la intensidad crítica de flujo la interacción entre el líquido y la pared llega a ser tan alta que las películas protectoras son destruidas por los elementos de turbulencia cercanos a la pared que también previenen la regeneración de la película protectora. En este caso la disolución de la superficie del metal desprotegida es controlada por el transporte de masa. La apariencia típica de las superficies es en forma de estrías, picado, agujeros redondeados como resultado de acciones caóticas de la turbulencia cercana a la pared.

La corrosión por CO<sub>2</sub> también presenta casos donde no hay formación de películas protectoras, bajo tales condiciones la velocidad de disolución del metal es también controlada por el transporte de masa, siendo éste menor que en el caso anterior.



Figura 1. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad crítica de flujo

Fuente: CORROSION NACEExpo 2006 paper 06112

A elevadas temperaturas la intensidad del flujo crítico necesario para la destrucción de películas protectoras y la iniciación de la corrosión localizada aumenta porque las películas más protectoras se forman a temperaturas altas. La figura 2 muestra el control de la velocidad de corrosión en función de la velocidad del fluido<sup>[4]</sup>.

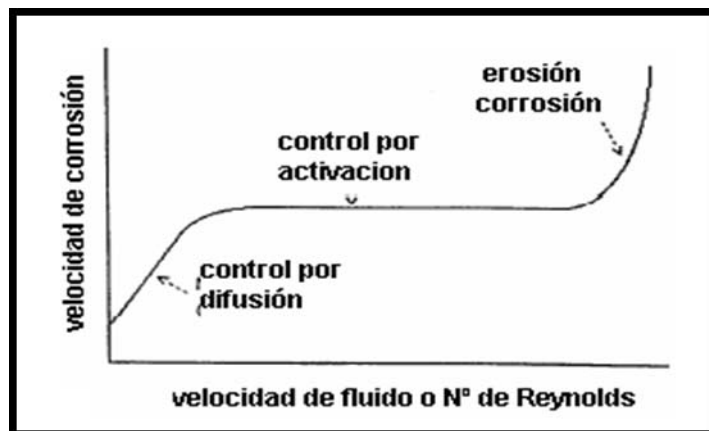


Figura 2. Variación de la velocidad de corrosión con la velocidad de flujo.

Fuente: CORROSION ENGINEERING Vol. 48 3, 1992.

**2.3.5 pH.** El pH afecta las reacciones electroquímicas y la precipitación de los productos de corrosión, este tiene un efecto dominante sobre la formación de películas de corrosión debido a su efecto en la solubilidad del carbonato de hierro.

El pH de las soluciones que produce corrosión por CO<sub>2</sub> generalmente oscila entre 3 y 6. Cuando el valor de pH está entre 3 y 4 el fenómeno de corrosión está dominado por la transferencia de masa; dicho en otras palabras, la difusión de H<sup>+</sup> controla el proceso. Por el contrario, cuando el pH de la solución se encuentra en el intervalo entre 4 y 6 (Ver tabla 2), el proceso de transferencia de carga de ácido carbónico y bicarbonato controlan la corrosión. El incremento del pH disminuye la solubilidad del FeCO<sub>3</sub>, dando altas probabilidades de formación de una película protectora. Altos pH también dan como resultado una disminución en la velocidad de corrosión, ya que disminuye la disponibilidad de los iones H<sup>+</sup>, y por lo tanto, disminuye la velocidad de la reacción de reducción del hidrógeno.

| pH    | ETAPA CONTROLANTE DE LA CORROSION   |
|-------|---|
| 3 a 4 | Transferencia de masa (la difusión de H <sup>+</sup> controla el proceso) |
| 4 a 6 | Transferencia de carga de H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> y bicarbonato    |

Tabla 2. Efecto del pH en la etapa controlante de la corrosión.

Fuente: Estudio sobre la corrosión en líneas de producción de pozos de petróleo.

**2.3.6 Formación de capas.** En la corrosión de aceros al carbono y de baja aleación, en un ambiente húmedo con CO<sub>2</sub> se obtiene carbonato de hierro como producto de la reacción. Esta capa por debajo de los 60°C no es muy protectora, y por encima es más protectora, aumentando dicha característica en la medida en que aumente la temperatura hasta los 100°C, a esta temperatura también se puede formar unas capas de magnetita que tiene un carácter protector, lo cual

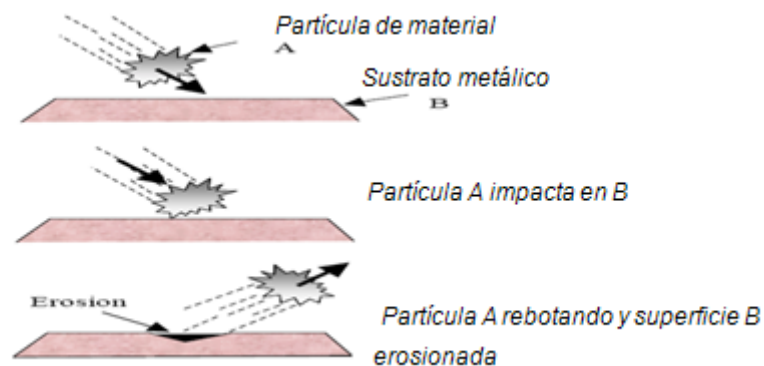
significa que reduce la velocidad de corrosión limitando el transporte de las especies reactivas a la superficie metálica.

**2.3.7 Presencia de partículas.** A altas velocidades de flujo, las partículas de arena evitan la formación de una capa protectora, ocasionando una alta velocidad de penetración en la pared debido al impacto de las partículas sobre las paredes de la tubería. Características de las partículas como la concentración, velocidad de impacto, ángulo de impacto, tamaño, morfología, densidad, dureza y fragilidad pueden tener efectos determinantes en la velocidad de corrosión.

## 2.4 EROSION.

La erosión es el proceso de desgaste mecánico ocasionado por el impacto de partículas sólidas sobre la superficie de un material (figura 3), lo que produce un daño localizado permanente y conlleva a la remoción de material por distintos mecanismos, principalmente deformaciones micro mecánicas y fractura, o la combinación de ambos<sup>[7]</sup>.

Figura 3. Esquema del desgaste por erosión.



Fuente: Vincent et al (23).

En el proceso de desgaste por erosión, existen dos mecanismos que constituyen la base del fenómeno, describiendo de esta manera el modo secuencial del daño. En materiales dúctiles, la incidencia del erosivo genera una drástica deformación plástica localizada, así como endurecimiento por deformación y formación de costras. En tales casos, la geometría de la deformación debido al impacto de las partículas, depende principalmente de la velocidad de impacto. Por otro lado, en los materiales frágiles el deterioro es causado por agrietamiento, fractura y desprendimiento de pequeñas partes del material<sup>[8]</sup>.

Existe un extenso número de factores que asumen un papel determinante en el proceso erosivo de los materiales de ingeniería, principalmente de los aceros. Datos seleccionados experimentalmente revelan resultados valiosos para las nuevas investigaciones. Rao y Buckley [1985], descubrieron que tanto la energía de superficie, así como la tensión, volumen atómico, punto de fusión, y dureza exhiben buena correlación con la erosión. A pesar de ello, estas propiedades no son satisfactorias en la predicción de la velocidad de erosión relativa de ciertos aceros. Probablemente tales propiedades no son lo suficientemente sensibles como para responder a las pequeñas diferencias, que en últimas, reflejan sutiles discrepancias en la morfología o susceptibilidad a la fractura de las fases deformadas en la microestructura de los aceros.<sup>[9]</sup>

## **2.5 FACTORES QUE AFECTAN LA EROSION**

**2.5.1. Velocidad de las partículas.** Investigadores han reportado que la velocidad de erosión es proporcional a la velocidad de impacto según la relación:

$$\epsilon = b V^n \quad (2)$$

Donde V es la velocidad de las partículas y n corresponde al valor de 2 a 2,3<sup>[10,11]</sup>

**2.5.2 Morfología de las partículas.** Tanto para materiales dúctiles como frágiles, se conoce que la erosión más efectiva se encuentra asociada a partículas con morfología angular <sup>[12]</sup> La erosión en estado estacionario por partículas esféricas generalmente desarrolla una topografía de superficie de “colinas y valles”, con el área de la misma siendo significativamente mayor que las dimensiones del impacto propiamente dicho. Esto es distinto a la topografía de superficie producida por partículas angulares.

**2.5.3 Angulo de impacto.** El ángulo de incidencia o el ángulo de ataque de las partículas sobre la superficie de un material influyen ampliamente en la velocidad de erosión. La influencia del ángulo de impacto es dependiente del tipo de material. Para materiales dúctiles la máxima pérdida por erosión ocurre a ángulos cercanos a los 20°. Para materiales frágiles la pérdida por erosión sucede a 90° (incidencia normal).

**2.5.4 Tamaño de partículas.** La implementación del criterio de disipación de energía como factor controlante de la pérdida de material por erosión ha permitido investigar el efecto del tamaño de partícula. La comparación de este efecto con respecto a la velocidad de erosión se puede realizar correlacionando la energía de disipación con la pérdida de material a través de la determinación de los valores de la energía específica, es decir, la energía cinética de impacto requerida para remover la unidad de volumen del material de prueba.

Para materiales dúctiles, la erosión relativa es esencialmente independiente del tamaño de partícula por encima de cierto valor crítico. Stack y colaboradores [2003] encontraron que, la velocidad de erosión es dependiente del tamaño del erodente en el rango de 50 a 100  $\mu\text{m}$ , pero para valores de tamaño de partículas mayores a 100  $\mu\text{m}$ , la dependencia de la velocidad de erosión se reduce considerablemente <sup>[13]</sup>.

**2.5.5 Dureza superficial.** La dureza superficial es el parámetro habitualmente escogido para describir la variación en la velocidad de erosión de materiales dúctiles. La dureza es probablemente la variable mas apropiada para caracterizar la respuesta a la erosión tanto de materiales dúctiles como frágiles.

## **2.6 CORROSION-EROSION.**

**2.6.1 Factores Críticos de la Corrosión - Erosión** <sup>[2]</sup>. En la mayoría de los casos, la corrosión desempeña un papel importante de modo que muy pocas veces se presenta erosión pura. Por tal razón es crítico considerar la contribución que hace la corrosión al proceso de deterioro de un material.

- La velocidad de pérdida de metal dependen de la velocidad y de la concentración del medio (es decir, partículas, líquidos, gotitas, mezclas, flujo bifásico), el tamaño, densidad y la dureza de partículas del medio, la dureza y resistencia a la corrosión del material sujeto a erosión, y el ángulo de impacto.
- El aumento de dureza del metal no siempre mejora la resistencia a la erosión, especialmente donde la corrosión desempeña un papel significativo.
- Para cada combinación de ambiente-material, hay a menudo una velocidad máxima por encima de la cual el impacto de las partículas puede producir pérdida del metal.
- El aumento de la corrosividad del ambiente puede reducir la estabilidad de las películas superficiales protectoras y aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal. El metal se puede eliminar de la superficie como iones disueltos, o

como productos sólidos de la corrosión que se retiran mecánicamente de la superficie del metal.

- Factores que contribuyen a un aumento en la corrosividad del ambiente, tal como la temperatura, pH, etc., pueden aumentar la susceptibilidad a la pérdida del metal.

La complejidad del proceso de erosión-corrosión además depende de algunos factores como son:

- Material (dureza, elementos aleantes, modulo de elasticidad, microestructura, tratamiento térmico)
- Partículas (velocidad, tamaño, forma, densidad, ángulo de impacto, dureza, modulo elástico.
- Condiciones de flujo (velocidad, número de Reynolds)
- Ambientes corrosivos (pH, potencial electroquímico, presencia de iones, viscosidad, presión y temperatura).

## **2.7 TECNICAS ELECTROQUIMICAS PARA LA EVALUACION DE VELOCIDADES DE CORROSION<sup>[14]</sup>.**

**2.7.1 Curvas de polarización:** En las curvas de polarización se aplica un barrido de potencial de  $\pm 250$  mV con respecto al potencial de corrosión. El barrido se empieza en  $-250$  mV, es decir en la zona catódica. El logaritmo de la densidad de corriente obtenida se grafica en función del barrido de potencial.

En las curvas de polarización (E vs Log i) se obtienen unos segmentos lineales cerca al potencial de corrosión, estos segmentos son conocidos como las regiones Tafel donde se hallan las pendientes anódica y catódica; la extrapolación de estos segmentos al potencial de corrosión permiten encontrar la densidad de corriente de corrosión.

**2.7.2 Resistencia a la polarización:** un método más exacto para encontrar la corriente de corrosión es usar la técnica de resistencia a la polarización, junto con los datos de las pendientes de Tafel anódica y catódica. La resistencia a la polarización, se define como la tangente de la curva de polarización (E vs I) en el potencial de corrosión, basándose en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión,  $E_{corr}$ .

$$R_p = (dE/di)_{E=E_{corr}} \quad (3)$$

Este método tiene la ventaja de requerir solo la aplicación de polarizaciones pequeñas, que en la mayoría de los casos no alteran la superficie del electrodo de trabajo o material de prueba. Consiste en aplicar mediante un potenciostato un sobrepotencial de  $\pm 20\text{mV}$  alrededor del potencial de reposo y obtener una respuesta de corriente lineal con el voltaje. Con la resistencia a la polarización ( $R_p$ ) y las pendientes Tafel a partir de las curvas de polarización, la densidad de corriente de corrosión se puede hallar por la ecuación de Stern-Geary:

$$i_{corr} = [B_a \cdot B_c / (2.3 (B_a + B_c))] / R_p \quad (4)$$

$$i_{corr} = [b / 2.3] / R_p \quad (5)$$

Donde:

$i_{\text{corr}}$  = Densidad de corriente de corrosión [ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ]

$b_a$  = Pendiente de Tafel anódica [mV]

$b_c$  = Pendiente de Tafel catódica [mV]

$b$  = Pendiente Tafel controlado por activación [mV]

$R_p$  = Resistencia a la polarización [ $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]

Por lo tanto, la velocidad de corrosión está dada por las ecuaciones para velocidad de penetración o velocidad de pérdida de peso:

$$V_{\text{corr}} = 0.13 i_{\text{corr}} PE / \rho \quad (6)$$

$$V_{\text{corr}} = 0.0895 i_{\text{corr}} PE \quad (7)$$

Donde:

$V_{\text{corr}}$  = Velocidad de corrosión [mpy ó  $\text{mg}/\text{dm}^2\text{d}$ ]

$PE$  = Peso específico del material [g]

$\rho$  = Densidad del material [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]

**2.7.3 Ensayos con corriente alterna (Impedancias):** el método de impedancia proporciona una información amplia, ya que permite deducir el comportamiento de la interfaz metal/solución como una red de elementos resistivos y capacitivos, ya que el diagrama de impedancias ofrece una visión completa de los fenómenos corrosivos que tienen lugar.

Esta técnica se caracteriza por utilizar una señal de corriente alterna para excitar el electrodo de trabajo, a una amplitud generalmente de voltaje de  $\pm 20$  milivoltios y un barrido de frecuencia desde los 0.1 mHz hasta 100 KHz. Cuando la corriente alterna atraviesa la interfaz del electrodo, ésta se divide en dos partes: una corriente generada por el comportamiento capacitivo de la interfaz y la otra como una corriente de transferencia que se refiere al intercambio de cargas de las reacciones electroquímicas. Para analizar la variación de la impedancia con la frecuencia, se recurre al concepto de circuito equivalente, como se muestra en la figura 4.

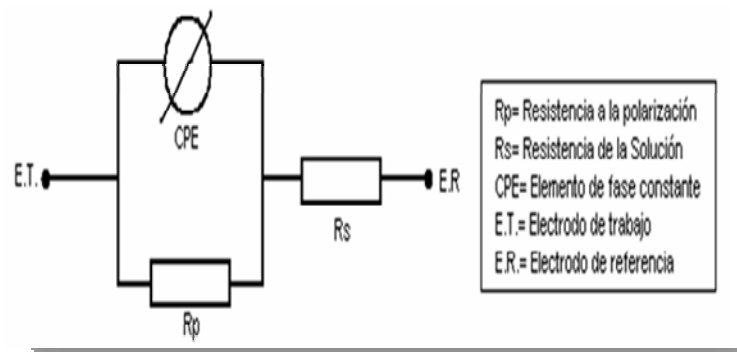
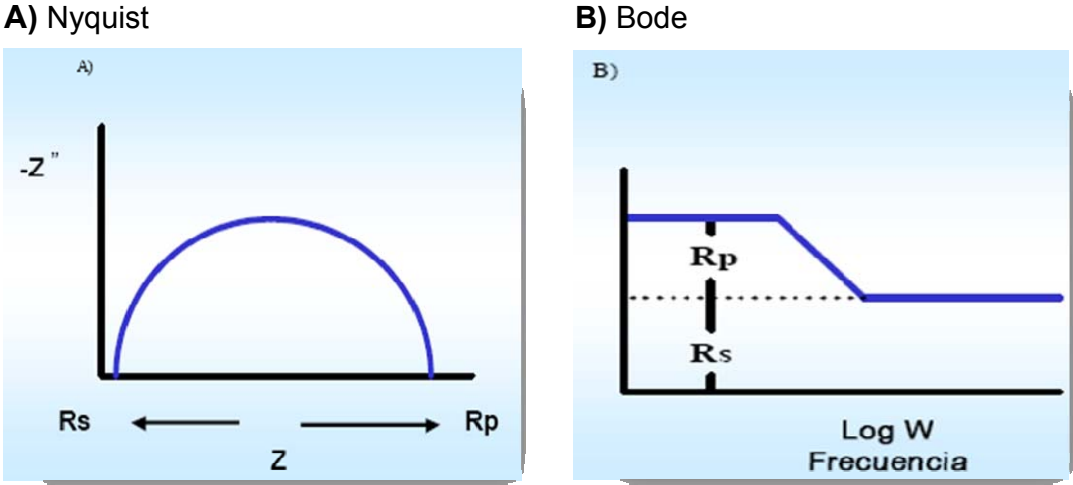


Figura 4. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución.

El método de impedancias tiene la ventaja de ser utilizado con buen resultado en medios de baja conductividad eléctrica. Las interfaces no son circuitos resistivos sencillos, sino que involucran además películas y capas con diferentes propiedades dieléctricas, difusión de especies desde o hacia la superficie, transferencia de carga, etc. Una celda electroquímica se comporta como una impedancia al aplicar un potencial eléctrico de tipo sinusoidal entre sus electrodos, luego es costumbre en los estudios por esta técnica representar el comportamiento del sistema por circuitos equivalentes. Existen los diagramas de Nyquist en donde se representa la respuesta de las resistencias en función de la

impedancia y el diagrama de Bode en donde se relacionan resistencias, impedancias, frecuencias y ángulos de fase, (figura 5).

Figura 5. Diagramas de Impedancia: Nyquist y Bode.



Fuente: Control de la corrosión, estudio y medida por técnicas electroquímicas

### **3. METODOLOGIA**

En este trabajo de grado se realizó la determinación de la velocidad de corrosión-erosión en probetas de acero API 5L grado 65 (API 5L X65) en sistemas multifásico CO<sub>2</sub>-salmuera-arena-aceite mineral utilizando la metodología que se describe a continuación.

Esta sección contiene las especificaciones de los materiales empleados, dimensiones de las muestras a ensayar, los equipos de laboratorio y las técnicas utilizadas.

#### **3.1 REVISION BIBLIOGRAFICA**

La primera etapa del trabajo donde se recopiló la información y estado del arte necesaria para el desarrollo de este proyecto, Para este fin se recurrió a los diferentes medios, como libros, artículos, revistas, Internet, bases de datos, investigaciones y la interacción de información con el grupo de investigaciones en corrosión de la UIS (GIC).

#### **3.2 FABRICACION DE PROBETAS**

Se fabricaron 40 probetas de acero API 5L X65 (fotografía 1), que es un acero de baja aleación, de gran uso en la fabricación de tuberías y transporte de crudo.

Fotografía 1. Probeta de acero API 5L X65.



Fuente: Los autores

Dimensiones de la probeta:

- 12 mm de diámetro externo.
- 6 mm de diámetro interno.
- 8 mm de altura.
- 3.02 cm<sup>2</sup> de área externa.

### **3.3 CARACTERIZACION DEL MATERIAL DE TRABAJO**

El análisis se realizó por la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X por energía dispersa. Se analizaron dos puntos diferentes y la composición corresponde al promedio de los datos obtenidos. Los datos se observan en la tabla 3.

Tabla 3. Composición química del acero API 5L X65.

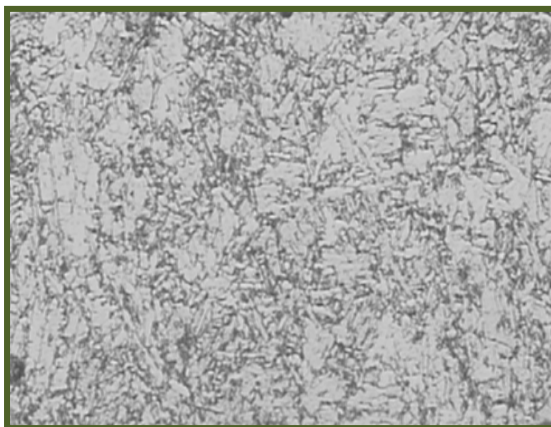
| ELEMENTO  | COMPOSICION (%) ACERO API 5L X65 (espectrometría de fluorescencia de rayos x) | COMPOSICION DEL ACERO API 5L X65 |
|-----------|---|----------------------------------|
| CARBONO   | 0,22±0,13   | 0,22-0,26                        |
| MANGANESO | 1,471±0,017   | 1,40-1,48                        |
| FOSFORO   | 0,011±0,005   | 0,011-0,025                      |
| AZUFRE    | 0,007±0,003   | 0,005-0,015                      |
| HIERRO    | 97,375±0,126  |                                  |
| SILICIO   | 0,466±0,019   |                                  |
| CROMO     | 0,235±0,007   |                                  |
| ALUMINIO  | 0,120±0,021   |                                  |
| MOLIBDENO | 0,013±0,003   |                                  |

Fuente: Técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X.

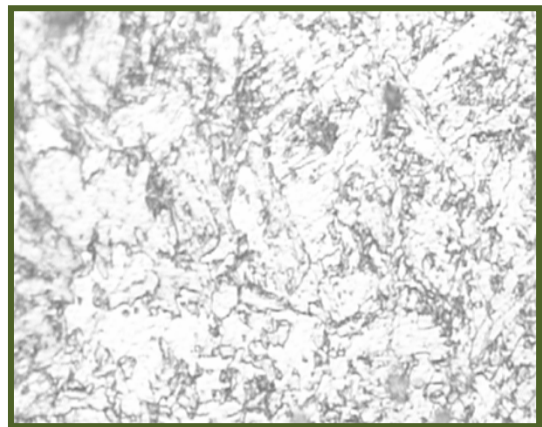
La microestructura mostrada en la figura 2 es característica de aceros de bajo carbono en estado normalizado y está compuesta de granos de ferrita y perlita con un tamaño de grano ferrítico fino No. 8 de acuerdo con la norma ASTM E-112 de 1996.

Fotografía 2. Microestructura del acero API 5L X65

o Micrografía tomada a 50x



2. Micrografía tomada a 100x



Fuente: Analizador de imágenes, Universidad Industrial de Santander

**Dureza.** Se midió la dureza a la sección transversal de la probeta, con un medidor de dureza en la escala Rockwell A, con una carga aplicada de 60 Kg y un indentador con punta de diamante de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM – 10 de 2001. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Prueba de dureza del acero API 5L X65.

| PUNTO             | DUREZA     |         |
|-------------------|------------|---------|
|                   | ROCKWELL A | BRINELL |
| 1                 | 52         | 140     |
| 2                 | 52         | 140     |
| 3                 | 53         | 145     |
| 4                 | 51         | 137     |
| 5                 | 51         | 137     |
| 6                 | 53         | 145     |
| D <sub>prom</sub> | 52         | 141     |

Fuente: Los autores

### 3.4 CARACTERIZACION DE LA ARENA <sup>[15]</sup>

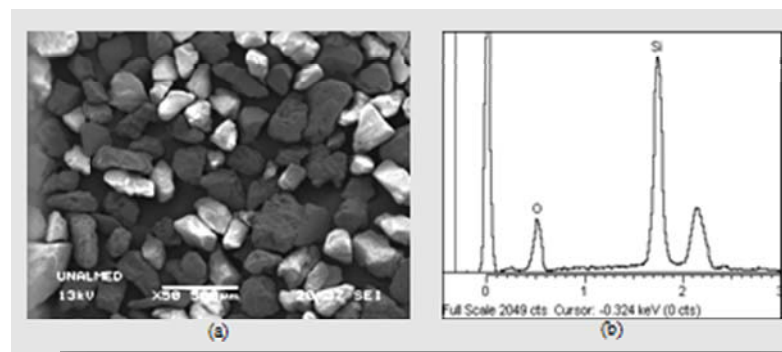
El tipo de arena utilizada procede del municipio de Sabana de torres de forma angular con una dureza según la escala de Mohs de 7.

La composición química de la arena fue realizada por medio de la técnica Espectroscopia de Absorción Atómica de llama. Utilizando el siguiente método: la muestra fue sometida a digestión con HF concentrado en crisol de platino y el residuo se disolvió en HCl 50%. En la disolución obtenida se determinó Al, Fe, K, Na, Mg, Ca y Si. En la tabla 5 se muestran las diferentes especies encontradas y se expresa en porcentaje en peso de cada elemento cuantificado. Los resultados obtenidos garantizaron la utilización de arena de alta pureza, que se corroboró por SEM y EDS mostrados en la figura 6-a y 6-b respectivamente.

Tabla 5. Análisis Química por AAE de la muestra de Arena.

| Nombre de la muestra | Parámetros analizados |                  |              |               |                |              |                |
|----------------------|-----------------------|------------------|--------------|---------------|----------------|--------------|----------------|
|                      | $Al_2O_3$<br>[%]      | $Fe_2O_3$<br>[%] | $MgO$<br>[%] | $K_2O$<br>[%] | $Na_2O$<br>[%] | $CaO$<br>[%] | $SiO_2$<br>[%] |
| Arena                | 0,094                 | 0,028            | 0,033        | 0,060         | 0,107          | 0,027        | 99,7           |

Figura 6. SEM y EDS para la muestra de arena



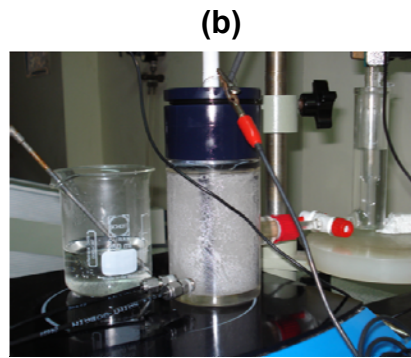
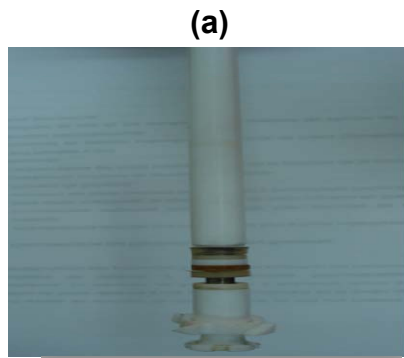
Fuente: Trabajo de grado Jesús Machuca.

### 3.5 CARACTERIZACION DEL ACEITE MINERAL.

Se escogió este tipo de hidrocarburo ya que no presenta impurezas que interfieran en el estudio del fenómeno corrosivo, para la realización de los ensayos se utilizo un 10%. La caracterización de las viscosidades y densidades de la mezcla aceite salmuera a diferentes temperaturas se presenta en la tabla 14.

### 3.6 EQUIPOS Y MATERIALES EMPLEADOS EN LA EXPERIMENTACION

Fotografía 3. Electrodo de cilindro rotatorio: (a) eje para el ensayo (b) Celda electrodo de cilindro rotatorio.



Fuente: Los autores

Se utilizó un electrodo de cilindro rotatorio con una celda modificada de erosión-corrosión (fotografía 3), la cual consistió de una coraza de polimetil metacrilato (acrílico) con capacidad de 200 ml de solución, que contiene un eje con rotación variable, ajustable con el controlador de velocidad (fotografía 4a), las medidas electroquímicas se determinaron por medio del potenciostatogalvanostato Gamry EG&G (fotografía 4b).

Fotografía 4. Controlador de velocidad del cilindro rotatorio y potenciostatogalvanostato Gamry.



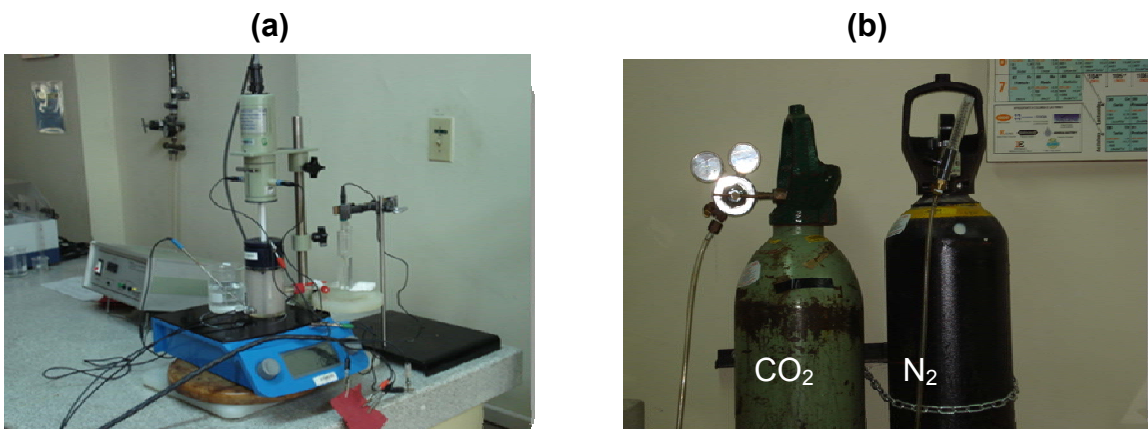
Fuente: Los autores

### 3.7 DESCRIPCION DEL MONTAJE REALIZADO PARA LOS ENSAYOS

Pasos para realizar el montaje donde se hizo los ensayos:

1. Limpieza de los materiales utilizados en el montaje.
2. Preparación del tubo lugin.
3. Preparación de la mezcla aceite mineral (10% en volumen) - NaCl (3% en peso) – agua desionizada - partículas de  $\text{SiO}_2$  – burbujeando posteriormente  $\text{CO}_2$  (5% en volumen).
4. Encendido de la plancha de calentamiento a la temperatura requerida por el ensayo.
5. Ensamble de las conexiones de los gases ( $\text{N}_2$  y  $\text{CO}_2$ ). (Fotografía 5b).
6. Montaje de la probeta al eje del cilindro.
7. Ubicación del contra electrodo (platino).
8. Acople de la celda en el electrodo de cilindro rotatorio. (Fotografía 5a).
9. Encendido del controlador de velocidad. (Fotografía 4a).
10. Conexión de los cables del potenciostato (Gamry).
11. Realización de pruebas electroquímicas. (Fotografía 4b).

Fotografía 5. Montaje completo para los ensayos y Cilindro de gases.



Fuente: Los autores

### 3.8 VARIABLES DEL SISTEMA

Tabla 6. Variables para el desarrollo del experimento.

| EQUIPO                          | PRUEBAS        | VELOCIDAD DE ROTACION (m/s) | % DE ARENA EN PESO | T(°C) | ACEITE MINERAL | % DE NaCl EN PESO | TAMAÑO DE PARTICULA (µm) | OBJETIVO               |
|---------------------------------|----------------|-----------------------------|--------------------|-------|----------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| ELECTRODO DE CILINDRO ROTATORIO | Rp, EIS, TAFEL | 1                           | 1                  | 27    | 10% en peso    | 3%                | 50                       | VELOCIDAD DE CORROSION |
|                                 |                | 3                           | 5                  | 41    |                |                   | 175                      |                        |
|                                 |                | 5                           | 9                  | 55    |                |                   | 300                      |                        |

Fuente: Los autores.

#### 3.8.1 Diseño experimental estadístico

Para evaluar la influencia de cada variable independiente y la interacción entre ellas la variable dependiente (Velocidad de corrosión) se elaboró un diseño experimental de  $2^4$  para los ensayos de corrosión-erosión, junto con las pruebas de corrosión pura, lo cual permitió con un número mínimo de ensayos obtener la máxima información posible sobre el proceso estudiado, y así poder optimizar la experimentación requerida como se muestran en la tabla 7 y 8.

Tabla 7. Matriz para las pruebas de corrosión pura.

| ENSAYO | VELOCIDAD (m/s)    | TEMPERATURA (°C) | GAS CORROSIVO                 | ACEITE MINERAL | ENSAYOS A REALIZAR |
|--------|--------------------|------------------|-------------------------------|----------------|--------------------|
| 1      | 1                  | 27               | CO <sub>2</sub> 5% en volumen | 10% en peso    | Rp, EIS, TAFEL     |
| 2      | 1                  | 55               |                               |                |                    |
| 3      | 5                  | 27               |                               |                |                    |
| 4      | 5                  | 55               |                               |                |                    |
| 5      | CENTRO             |                  |                               |                |                    |
| 6      | REPETICION AL AZAR |                  |                               |                |                    |

Tabla 8. Matriz para las pruebas de corrosión-erosión.

| ENSAYO | VELOCIDAD (m/s)    | TEMPERATURA (°C) | %SiO <sub>2</sub> | TAMAÑO DE PARTICULAS (µm) | GAS CORROSIVO                 | ACEITE MINERAL | ENSAYO A REALIZAR |  |  |  |
|--------|--------------------|------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------|--|--|--|
| 1      | 1                  | 27               | 1                 | 50                        | CO <sub>2</sub> 5% en volumen | 10% en peso    | Rp, EIS, TAFEL    |  |  |  |
| 2      | 1                  | 27               | 1                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 3      | 1                  | 27               | 9                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 4      | 1                  | 27               | 9                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 5      | 1                  | 55               | 1                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 6      | 1                  | 55               | 1                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 7      | 1                  | 55               | 9                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 8      | 1                  | 55               | 9                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 9      | 5                  | 27               | 1                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 10     | 5                  | 27               | 1                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 11     | 5                  | 27               | 9                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 12     | 5                  | 27               | 9                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 13     | 5                  | 55               | 1                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 14     | 5                  | 55               | 1                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 15     | 5                  | 55               | 9                 | 50                        |                               |                |                   |  |  |  |
| 16     | 5                  | 55               | 9                 | 300                       |                               |                |                   |  |  |  |
| 17     | CENTRO             |                  |                   |                           |                               |                |                   |  |  |  |
| 18     | CENTRO             |                  |                   |                           |                               |                |                   |  |  |  |
| 19     | REPETICION AL AZAR |                  |                   |                           |                               |                |                   |  |  |  |
| 20     | REPETICION AL AZAR |                  |                   |                           |                               |                |                   |  |  |  |

Fuente: Los autores

### 3.9 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El procedimiento realizado antes de las pruebas electroquímicas siguió la norma ASTM G1-90:

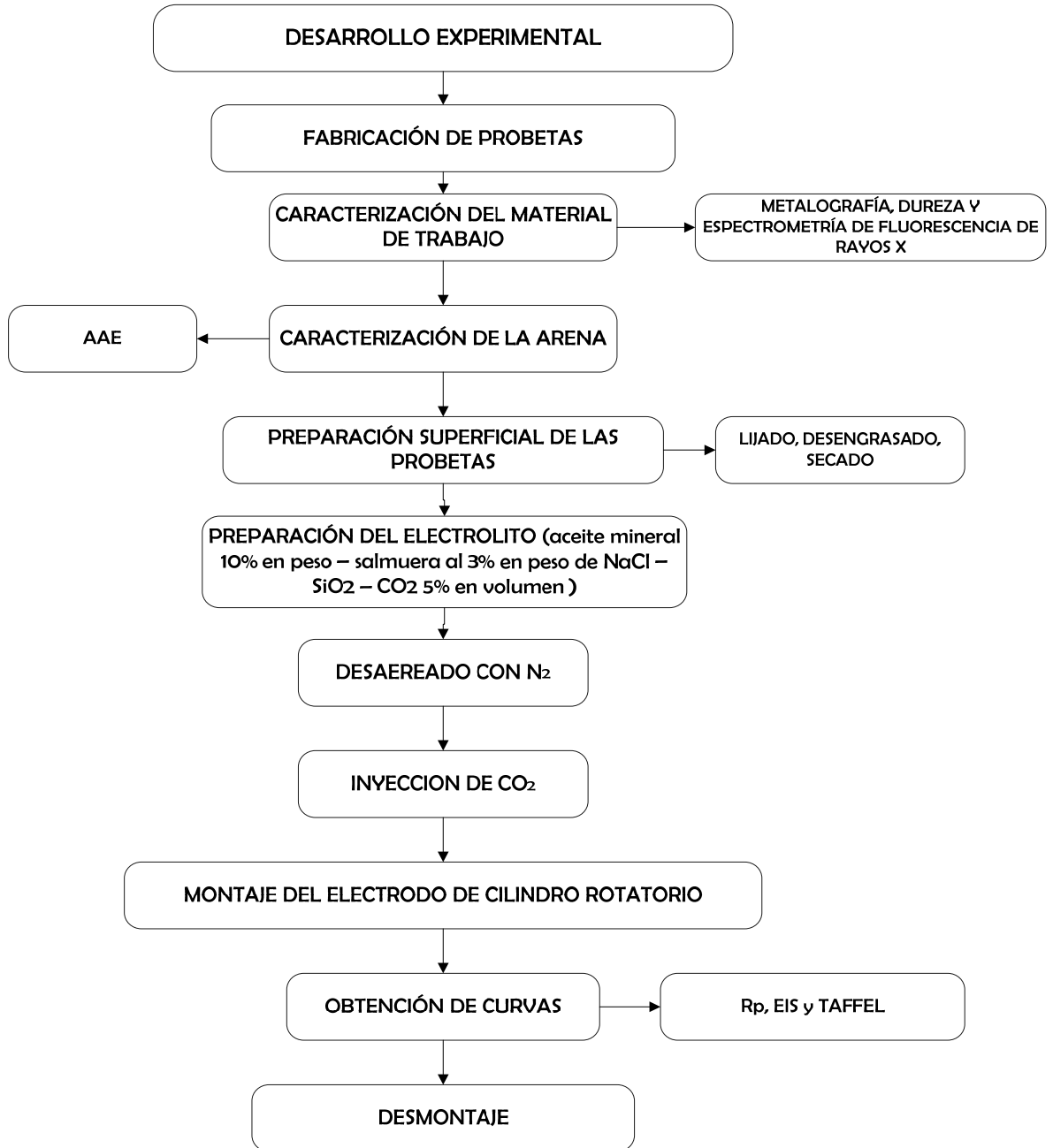
- Pulido de las probetas de acero API 5L X65 con papel carburo de silicio hasta lija 600.
- Desengrasado con agua y etanol.
- Secado con aire caliente.

Para la realización de las pruebas de laboratorio se elaboraron dos tipos de soluciones:

**Solución para las pruebas de corrosión pura.** La mezcla de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl, aceite mineral al 10% en peso, y con una mezcla de CO<sub>2</sub> al 5% en volumen (balance nitrógeno). La solución fue purgada con nitrógeno para reducir los niveles de oxígeno presentes en la solución con un caudal de 150 ml/min durante 30 minutos según la norma ASTM G59, y burbujeando después la mezcla con CO<sub>2</sub> al 5% en volumen durante 30 minutos, antes y durante la realización de los ensayos.

**Solución para las pruebas de corrosión asistida por erosión y erosión-corrosión.** La mezcla de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl y una mezcla de CO<sub>2</sub> al 5% en volumen (Balance nitrógeno) con partículas de SiO<sub>2</sub>. Los reactivos utilizados fueron analíticos de alta pureza. La mezcla fue purgada con nitrógeno para reducir al máximo su corrosividad, el caudal de flujo fue de 150 ml/min y el tiempo estimado de inyección del gas fue de 30 minutos según la norma ASTM G 59, y burbujeando después la mezcla de CO<sub>2</sub> al 5% en volumen durante 30 minutos más antes de la inmersión de la muestra, y después durante el ensayo se mantuvo constante el caudal de flujo de CO<sub>2</sub>.

#### 4. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA TÉCNICA DE EXPERIMENTACIÓN



## **5. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS**

En esta sección se presentan los resultados más importantes obtenidos en el desarrollo de la investigación, de acuerdo con las actividades propuestas en la metodología.

Los resultados de la caracterización del material y los diferentes tipos de fluidos fueron expuestos en los numerales 3.3 y 3.8 de la metodología cuyos resultados son aceptables para la realización de los ensayos.

En la tabla 3 y fotografía 2, se presentaron los resultados del análisis de la composición química del material y de la microestructura del electrodo de acero sobre el cual se determinaron las velocidades de corrosión. Este análisis indica que el material del electrodo corresponde a un acero al carbono API 5L X65 con una estructura metalúrgica de ferrita y perlita. Este material es utilizado en la fabricación de las tuberías que transportan el crudo en la industria del petróleo.

En la tabla 5 y figura 6 se obtuvieron los resultados pertenecientes a la composición química y morfológica de la arena, correspondiendo a un material de alta pureza ( $\text{SiO}_2$ ) y una morfología angular.

### **5.1 VELOCIDAD DE CORROSION SIN EROSION (CORROSION PURA).**

Los resultados obtenidos en esta etapa se refieren a las medidas de las velocidades de corrosión sin erosión del electrodo de acero al carbono API 5L X65 por el método de las técnicas de resistencia a la polarización, extrapolación de Tafel y Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) a diferentes velocidades de rotación y diferentes temperaturas bajo la norma ASTM G-102.

Las figuras 7 y 8 muestran los resultados de las técnicas de corriente directa. En la figura 7 se puede observar la disminución de las pendientes al aumentar la

velocidad de rotación, lo que significa que existe un aumento en la velocidad de corrosión al aumentar la velocidad del fluido, también se observa un aumento en la pendiente al aumentar la temperatura, estos resultados son concordantes con las curvas Tafel mostradas en la figura 8, donde se puede observar un desplazamiento hacia la derecha a medida que aumenta la velocidad del sistema y un desplazamiento hacia la izquierda al aumentar la temperatura. Un análisis de las curvas muestra que hay un control mixto en la interface del material y el flujo multifásico debido a las reacciones mixtas entre el gas, la salmuera y el aceite.

Figura 7. Curvas Rp a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.

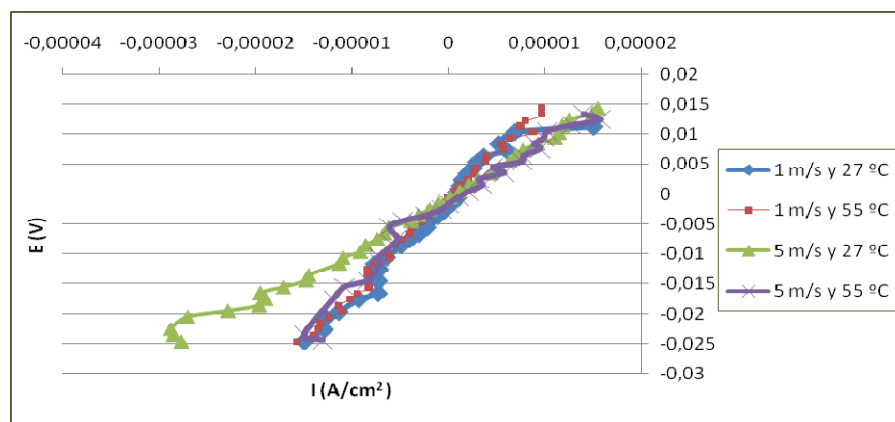
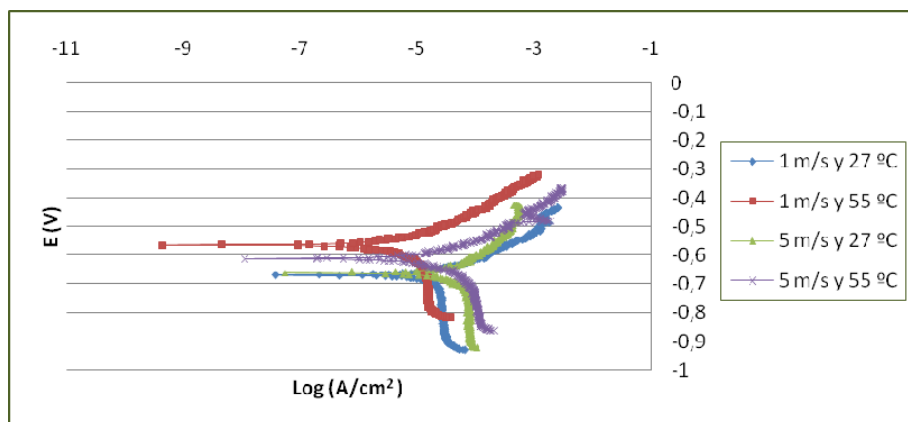


Figura 8. Curvas Tafel a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.

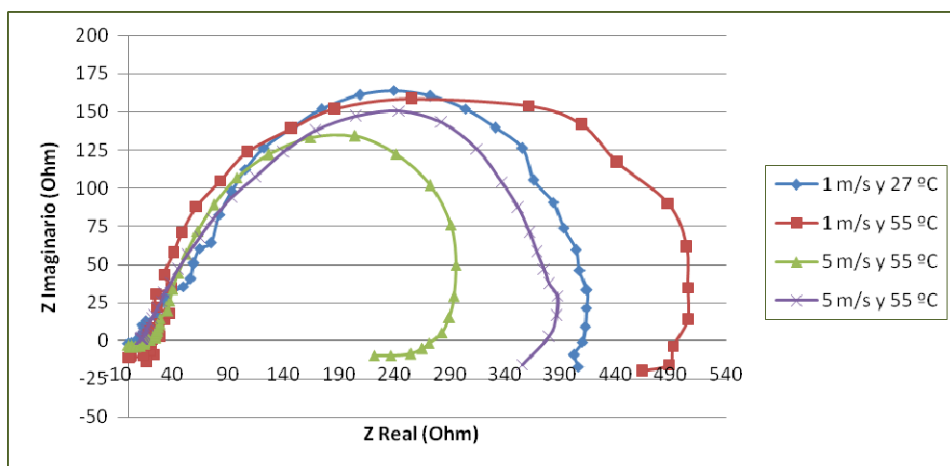


Fuente: Los autores

Los resultados de la técnica de corriente alterna se muestran en la figura 9, donde se observa un aumento en la resistencia a la polarización a medida que disminuye la velocidad de rotación y aumenta la temperatura, el comportamiento de la resistencia a la polarización es muy similar a los calculados por la técnica de corriente directa. La tabla 9 muestra los valores de resistencia a la polarización por ambas técnicas, el valor de corriente de corrosión en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y la velocidad de corrosión en mpy, los cálculos de estos valores son realizados según la norma ASTM G3-89.

Los diagramas de Nyquist muestran semicírculos capacitivos a altas frecuencias, y la tendencia de arcos inductivos en la parte inferior a más bajas frecuencias. El semicírculo capacitivo muestra la influencia de las propiedades dieléctricas de la doble capa electroquímica. El arco inductivo puede ser explicado por la disminución de la concentración en la superficie (variación sinusoidal con el cambio de fase, contra la medida de señal de voltaje) de una especie intermedia adsorbida involucrada en el mecanismo de disolución posiblemente por la adsorción de ácido carbónico sobre el sustrato metálico.<sup>[16]</sup>

Figura 9. Diagramas de Nyquist a diferentes velocidades de rotación y temperaturas.



Fuente: Los autores

Tabla 9. Resultados de la velocidad de corrosión del acero API 5L X65 por las técnicas de corriente directa y alterna.

| CORROSION PURA  |                  |                               |                               |                                     |                              |
|-----------------|------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| VELOCIDAD (m/s) | TEMPERATURA (°C) | Rp CD ( $\Omega\text{cm}^2$ ) | Rp CA ( $\Omega\text{cm}^2$ ) | Icorr ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Velocidad de corrosión (mpy) |
| 1               | 27               | 1324                          | 1238,7                        | 7,94                                | 3,67                         |
| 1               | 55               | 1568                          | 1480                          | 5,01                                | 2,34                         |
| 5               | 27               | 871,6                         | 820                           | 12,88                               | 5,94                         |
| 5               | 55               | 1271                          | 1039                          | 10                                  | 4,62                         |

Fuente: Los autores

## 5.2 VELOCIDAD DE CORROSION-EROSION.

Los resultados obtenidos en esta etapa se refieren a las medidas de las velocidades de corrosión asistida por erosión del electrodo de acero al carbono API 5L X65 por el método de las técnicas de resistencia a la polarización, extrapolación de Tafel y Espectroscopia de impedancia electroquímica(EIS) a diferentes velocidades de rotación.

**5.2.1 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula a 1m/s y 27 °C.** La figura 10 muestra la resistencia a la polarización cuando las condiciones de ensayo se llevaron a cabo a una velocidad de 1 m/s y una temperatura de 27°C, variando los porcentajes y tamaño de partículas, se observa que la mayor resistencia a la polarización (Rp) dada por la pendiente de las curvas, corresponde a las obtenidas con un tamaño de partícula de 50  $\mu\text{m}$  y 1% de  $\text{SiO}_2$ , lo que significa que esta tiene una menor velocidad de corrosión lo que está de acuerdo con los diagramas de Nyquist para estas mismas condiciones, ver figura 11. En estos diagramas se observa la formación de un segundo semicírculo o lazo inductivo a bajas frecuencias mostrado de igual forma en la segunda etapa de experimentación debido a la

acción del  $\text{CO}_2$  en el sistema o por un posible cambio de rugosidad de la superficie del material.

En la figura 12 se muestra las graficas Tafel donde se puede observar la formación de la corriente límite, pero debido a que el ensayo de impedancia no mostro el comportamiento Warburg se deduce que hay un control mixto en el sistema; para 300 micras y 1% de  $\text{SiO}_2$  se observa la mayor densidad de corriente, presentando la mayor velocidad de corrosión. Se esperaría que la mayor velocidad de corrosión se alcanzara a 9% de partículas, hecho que se atribuye a que a esta velocidad no todas las partículas impactan el electrodo de trabajo debido a una posible interferencia entre ellas mismas.

Figura 10. Resistencia a la polarización a 1 m/s y 27 °C.

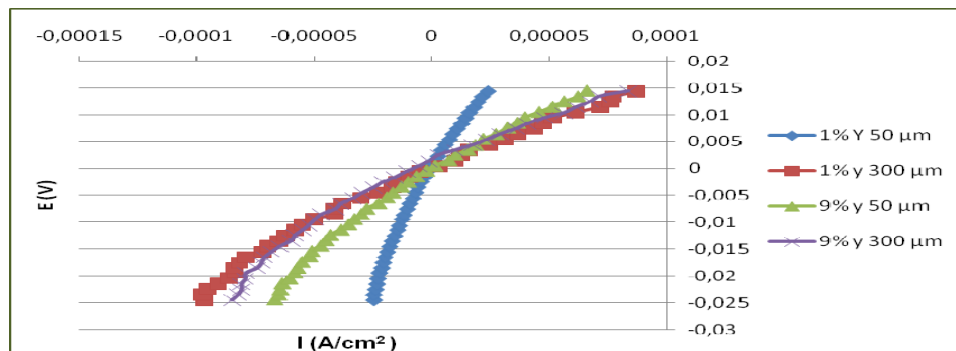
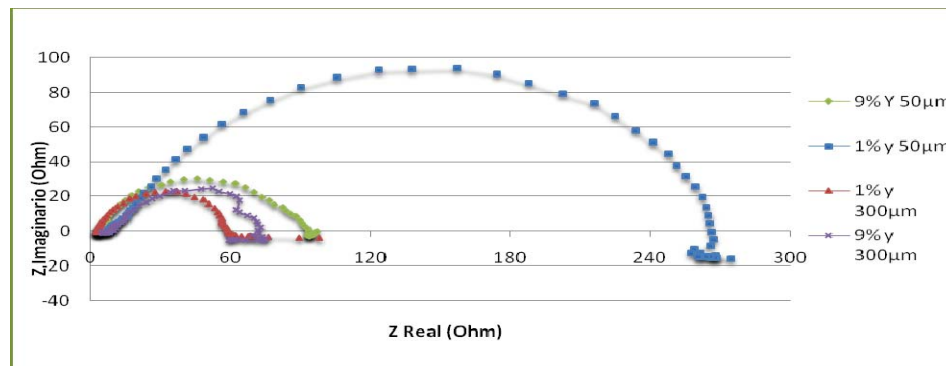


Figura 11. Diagramas de Nyquist a 1 m/s y 27 °C.



Fuente: Los autores

El cálculo de densidad de corriente se hizo por el método grafico de acuerdo con la norma ASTM G3-89. Con este valor y la ecuación 6 se calculó las velocidades de corrosión que se muestran en la tabla 10.

Figura 12. Curvas Tafel a 1 m/s y 27 °C.

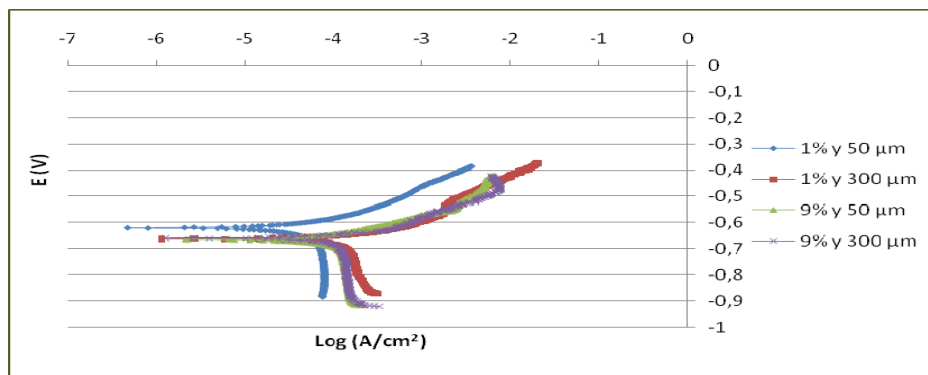


Tabla 10. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena-aceite mineral a 1 m/s y 27 °C.

| Temperatura 27 y Velocidad 1 m/s |                      |                           |                           |   |                              |
|----------------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%)             | TAMAÑO DE PARTICULAS | Rp CD (Ωcm <sup>2</sup> ) | Rp CA (Ωcm <sup>2</sup> ) | i <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | Velocidad de corrosión (mpy) |
| 1                                | 50                   | 787,1                     | 782,2                     | 17,8                                    | 8,2                          |
| 1                                | 300                  | 202,7                     | 181,2                     | 91,2                                    | 42,1                         |
| 9                                | 50                   | 282,7                     | 277,8                     | 56,2                                    | 26,0                         |
| 9                                | 300                  | 224,5                     | 214,4                     | 61,7                                    | 28,5                         |

Fuente: Los autores

Con los datos de la tabla 10 se puede deducir que a velocidad constante (1 m/s) y aumentando el tamaño de partícula se aumenta la velocidad de corrosión, debido que hay una mayor superficie de contacto removiendo mas la capa protectora (siderita) que se forma sobre el material.

**5.2.2 Velocidad de corrosión-erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a 1 m/s y 55 °C.** Las curvas de resistencia a la polarización se muestran en la figura 13 en las que se observa que a 1% y 50  $\mu\text{m}$  la pendiente de la curva es mayor; y que a las otras condiciones se tienen pendientes similares. Sin embargo los valores de  $R_p$  disminuyen con el aumento del porcentaje de partículas. La  $R_p$  mas baja se observa a 9% y 50 $\mu\text{m}$ , lo que significa la máxima velocidad de deterioro a esta condición, lo que está de acuerdo con los diagramas Nyquist para estas mismas condiciones, estos diagramas se presentan en la figura 14.

Figura 13. Resistencia a la polarización a 1 m/s y 55 °C.

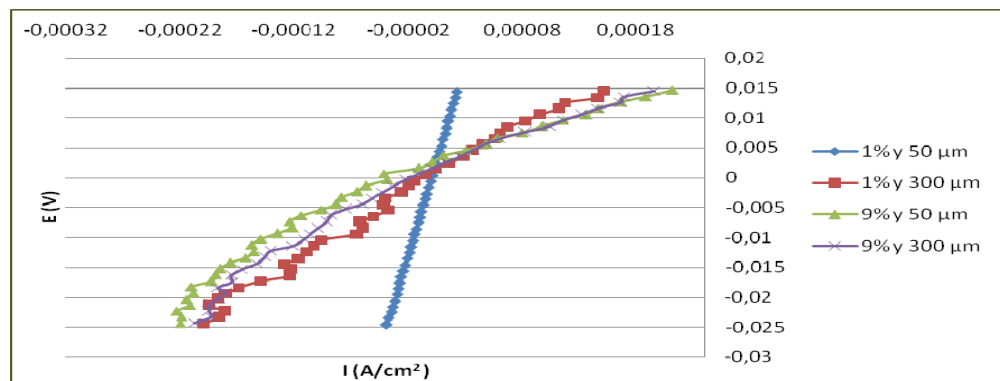
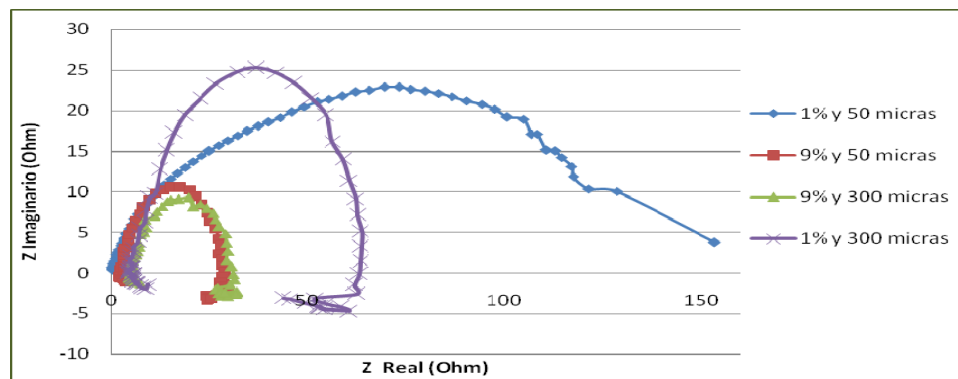


Figura 14. Diagramas de Nyquist a 1 m/s y 55 °C.

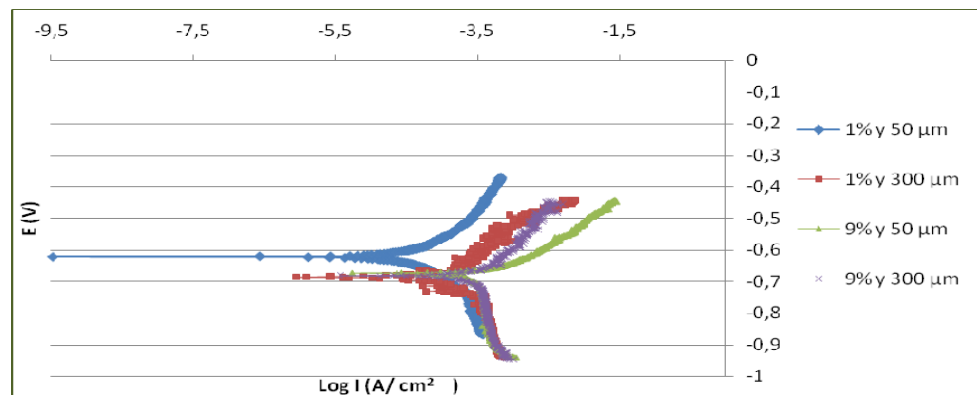


Fuente: Los autores

Al analizar los diagramas de Nyquist de la figura 14, se encuentra que al igual que en los demás sistemas, se observa la presencia de lazos inductivos posiblemente debido a la absorción de especies intermedias involucradas en el mecanismo de disolución.

Estos diagramas no muestran semicírculos perfectos, se observa una forma ovalada sobre el eje real principalmente a bajas frecuencias esto es debido posiblemente a las altas perturbaciones en la superficie ocasionadas por la arena<sup>[17]</sup>.

Figura 15. Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 1 m/s y 55 °C.



Fuente: Los autores

El proceso está controlado por difusión o transferencia de masa y por activación o transferencia de carga lo que indica un control mixto, también se observa un desplazamiento hacia la derecha de las curvas Tafel (Figura 15) que tienen un porcentaje mayor de partículas, donde la mayor densidad de corriente fue para el ensayo con 9% y 50 micras, lo que indica que es la condición más agresiva con la mayor velocidad de deterioro en todo el sistema, como se puede evidenciar en los resultados de la tabla 11.

Tabla 11. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena-aceite mineral a 1 m/s y 55 °C.

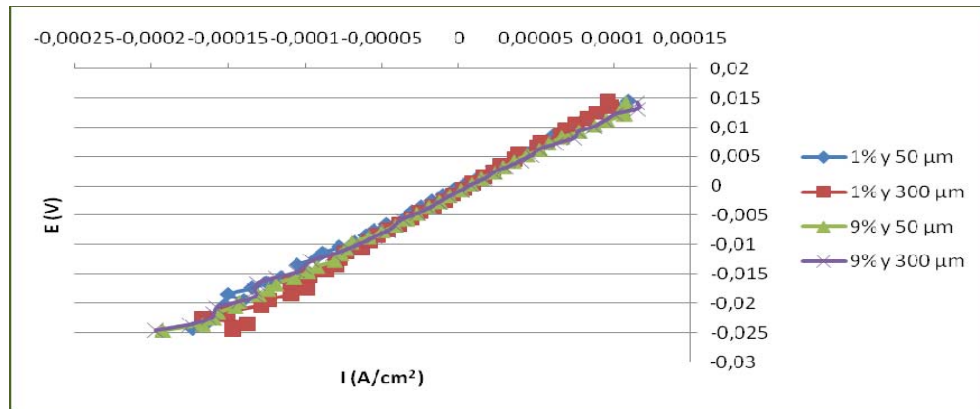
| Temperatura 55 y Velocidad 1 m/s |                      |                           |                           |   |                              |
|----------------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%)             | TAMAÑO DE PARTICULAS | Rp CD (Ωcm <sup>2</sup> ) | Rp CA (Ωcm <sup>2</sup> ) | i <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | Velocidad de corrosión (mpy) |
| 1                                | 50                   | 636,1                     | 463,8                     | 31,6                                    | 14,6                         |
| 1                                | 300                  | 112,9                     | 109,3                     | 144,5                                   | 66,7                         |
| 9                                | 50                   | 86,5                      | 84,6                      | 199,5                                   | 92,1                         |
| 9                                | 300                  | 94,7                      | 92,8                      | 158,5                                   | 73,2                         |

Fuente: Los autores

Con los datos de la tabla 11 se puede deducir que a 1% de partículas y aumentando de el tamaño de estas hubo un incremento en la velocidad de corrosión, mientras que a 9% de partículas cuando se aumento el tamaño de estas hubo una disminución en la velocidad de corrosión; debido a que hay una mayor interacción entre las partículas que no permiten que impacten el material.

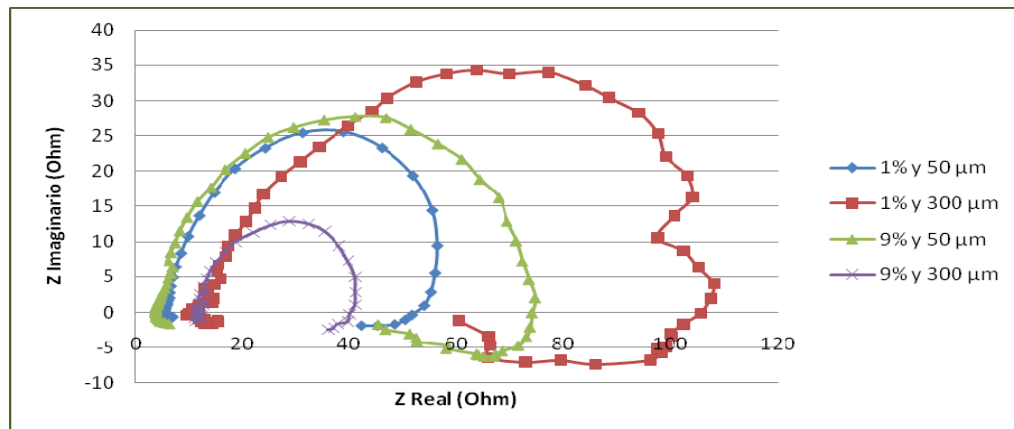
**5.2.3 Velocidades de corrosión-erosión a diferentes porcentajes y tamaños de partículas a 5 m/s y 27 °C.** La figura 16 muestra las curvas de resistencia a la polarización en las cuales se observan pendientes muy similares y mostrando el mismo comportamiento del sistema anterior donde disminuyó la Rp con el aumento de la concentración de partículas. La máxima velocidad de deterioro es a 9% de partículas y 300 micras, que está de acuerdo con los diagramas Nyquist para estas condiciones; estos diagramas se muestran en la figura 17.

Figura 16. Resistencia a la polarización a 5 m/s y 27 °C.



Fuente: Los autores

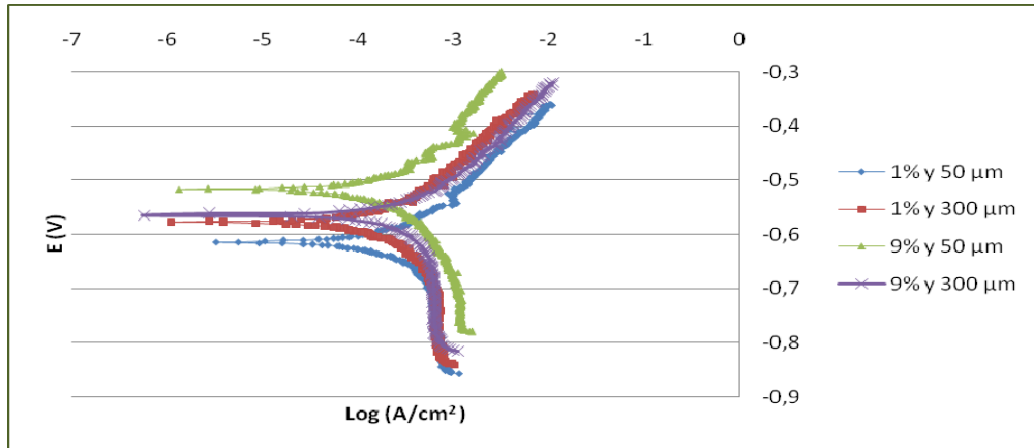
Figura 17. Diagramas de Nyquist a 5 m/s y 27 °C.



Fuente: Los autores

Al analizar los diagramas de Nyquist de la figura 17, se encuentra que al igual que en los demás sistemas, se observa la presencia de lazos inductivos posiblemente debido a la absorción de especies intermedias involucradas en el mecanismo de disolución, pero en este caso se puede atribuir también al daño superficial del material, debido a la velocidad de impacto de las partículas.

Figura 18. Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 5 m/s y 27 °C.



Fuente: Los autores

El proceso está controlado por difusión o transferencia de masa y por activación o transferencia de carga lo que indica un control mixto influenciado por el mojado del aceite a la superficie del material, también se observa un desplazamiento hacia la derecha de las curvas Tafel (Figura 18) que tienen un porcentaje mayor de partículas, donde la mayor densidad de corriente fue para el ensayo con 9% y 300 micras, lo que indica que es la condición más agresiva con la mayor velocidad de deterioro en todo el sistema, como se puede evidenciar en los resultados de la tabla 12.

Tabla 12. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena-aceite mineral a 5 m/s y 27 °C.

| Temperatura 27 y Velocidad 5 m/s |                      |                           |                           |   |                              |
|----------------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%)             | TAMAÑO DE PARTICULAS | Rp CD (Ωcm <sup>2</sup> ) | Rp CA (Ωcm <sup>2</sup> ) | i <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | Velocidad de corrosión (mpy) |
| 1                                | 50                   | 135,3                     | 125,4                     | 117,5                                   | 54,3                         |
| 1                                | 300                  | 149,3                     | 136,5                     | 95,5                                    | 44,0                         |
| 9                                | 50                   | 133,0                     | 121,7                     | 131,8                                   | 60,9                         |
| 9                                | 300                  | 128,0                     | 89,0                      | 154,8                                   | 71,5                         |

Fuente: Los autores.

**5.2.4 Velocidades de corrosión-erosión a diferentes porcentajes y tamaños de partículas a 5 m/s y 55 °C.** Las curvas de resistencia a la polarización se muestran en la figura 19 en las que se observa que a 1% y 300  $\mu\text{m}$  la pendiente de la curva es mayor; y que a las otras condiciones se tienen pendientes similares. Sin embargo los valores de  $R_p$  disminuyen con el aumento del porcentaje de partículas. La  $R_p$  mas baja se encuentra a 9% y 300 $\mu\text{m}$ , lo que significa la máxima velocidad de deterioro a esta condición, ya que el sistema fue muy inestable por factores como la velocidad de rotación del electrodo y la temperatura, por lo que no se pudo obtener los diagramas Nyquist (Ver anexos A,B,C,D).

Figura 19. Resistencia a la polarización a 5 m/s y 55 °C.

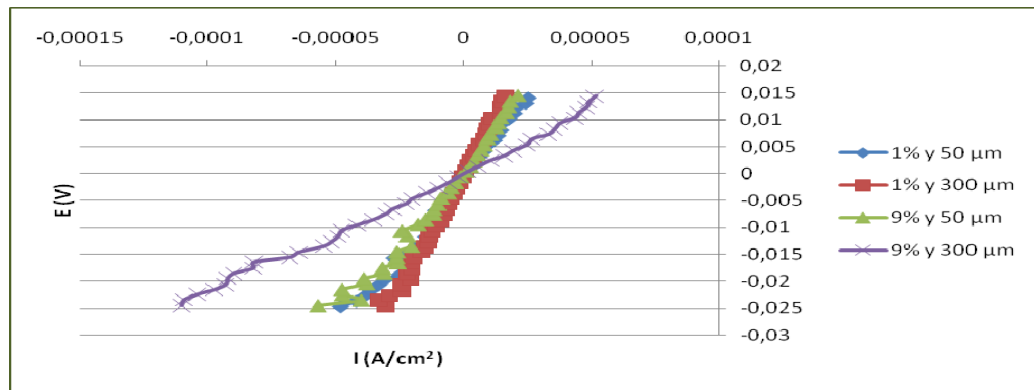
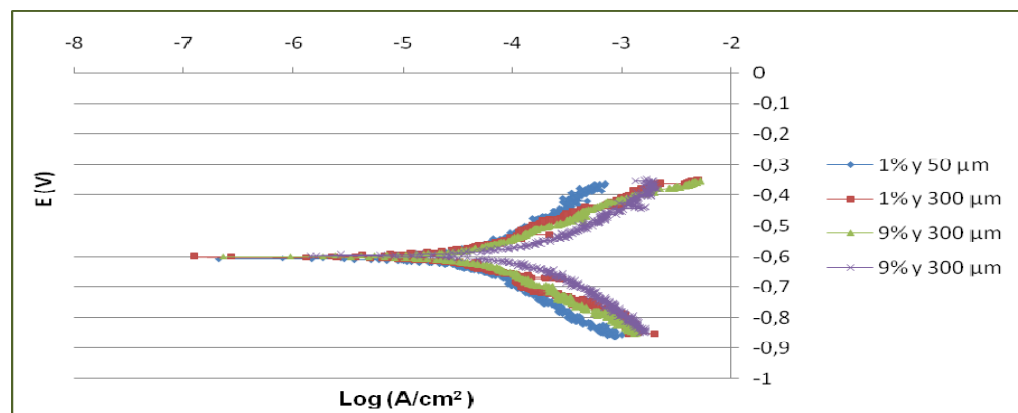


Figura 20. Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 5 m/s y 55 °C.



Fuente: Los autores

El proceso está controlado por activación o transferencia de carga donde posiblemente el aceite juega un papel importante en la mojabilidad de la superficie, también se observa un desplazamiento hacia la derecha de las curvas Tafel (Figura 20) que tienen un porcentaje mayor de partículas, donde la mayor densidad de corriente fue para el ensayo con 9% y 300 micras, lo que indica que es la condición más agresiva con la mayor velocidad de deterioro en todo el sistema, como se puede evidenciar en los resultados de la tabla 13. Comparando con los resultados anteriores la velocidad de corrosión es menor debido al efecto combinado de interferencia de las partículas entre si y a la mayor fluidez del aceite mineral, además del tiempo que tardó en estabilizarse el sistema.

Tabla 13. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena-aceite mineral a 5 m/s y 55 °C.

| <b>Temperatura 55 y Velocidad 5 m/s</b> |                      |                           |                           |   |                              |
|---|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|------------------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%)                    | TAMAÑO DE PARTICULAS | Rp CD (Ωcm <sup>2</sup> ) | Rp CA (Ωcm <sup>2</sup> ) | i <sub>corr</sub> (μA/cm <sup>2</sup> ) | Velocidad de corrosión (mpy) |
| 1                                       | 50                   | 595,4                     | —                         | 35,5                                    | 16,4                         |
| 1                                       | 300                  | 829,7                     | —                         | 13,5                                    | 6,1                          |
| 9                                       | 50                   | 550,9                     | —                         | 39,8                                    | 18,4                         |
| 9                                       | 300                  | 226,3                     | —                         | 51,3                                    | 23,7                         |

Fuente: Los autores

### **5.3 ANALISIS ESTADISTICOS DE LOS DATOS EXPERIMENTALES**

Después de recopilar los datos de las pruebas realizadas para los diferentes sistemas estudiados con base en el diseño experimental, se realizó el análisis estadístico, en donde se pudo comprobar la veracidad de los resultados, la interacción entre las variables y los efectos e influencia sobre la velocidad de corrosión.

Para realizar este estudio se cuenta con la ayuda del ANOVA (análisis de varianza), curvas de PARETO, y Gráfica de efectos principales. El diseño experimental garantiza el comportamiento de todos los puntos que se encuentren en el área definida por los valores máximos y mínimos de las variables.

**5.3.1 Correlación matemática.** La siguiente es la ecuación ajustada conocida como polinomio respuesta que relaciona la variable respuesta (Velocidad de corrosión) como una función de los factores y sus interacciones.

El polinomio respuesta para el sistema Salmuera-aceite mineral-CO<sub>2</sub> sin presencia de partículas (corrosión pura) es el siguiente:

$$V_{\text{corr}} = 4.34875 + 0.579821*Vel - 0.04625*Temp - 0.000178571*Vel*Temp$$

Donde:

$V_{\text{corr}}$  = Velocidad de corrosión en mpy

Vel = velocidad de rotación (m/s)

Temp = Temperatura (°C)

El polinomio respuesta para el sistema Salmuera-SiO<sub>2</sub>- aceite mineral-CO<sub>2</sub> con presencia de partículas (corrosión – erosión) es el siguiente:

$$V_{\text{corr}} = -58.0098 + 1.69743*Temp + 29.6758*Vel + 0.670692* \% \text{ part} + 0.129363*T \text{ part} - 0.687277*Temp*Vel + 0.0728795*Temp*\% \text{ part} - 0.018575*Vel*T \text{ part} - 0.0082375*\% \text{ part}*T \text{ part}.$$

Donde:

$V_{\text{corr}}$  = Velocidad de corrosión en mpy

Vel = Velocidad de rotación (m/s)

Temp = Temperatura (°C)

% part = Porcentaje de partícula

T part = Tamaño de partícula

**5.3.2 Análisis de Pareto.** En las figuras 21 y 22 se muestra el diagrama de Pareto, y como puede apreciarse, proporciona un orden de los efectos en cuanto a su magnitud. Sin embargo, este diagrama no ofrece la información acerca de la importancia estadística de cada uno de los efectos involucrados.

Figura 21. Interacciones entre las variables (método de Pareto) sistema Salmuera-aceite mineral-CO<sub>2</sub> sin partículas (corrosión pura).

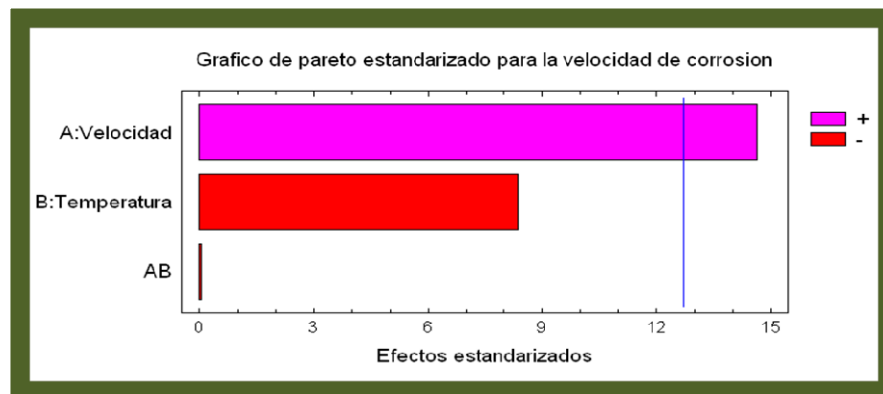
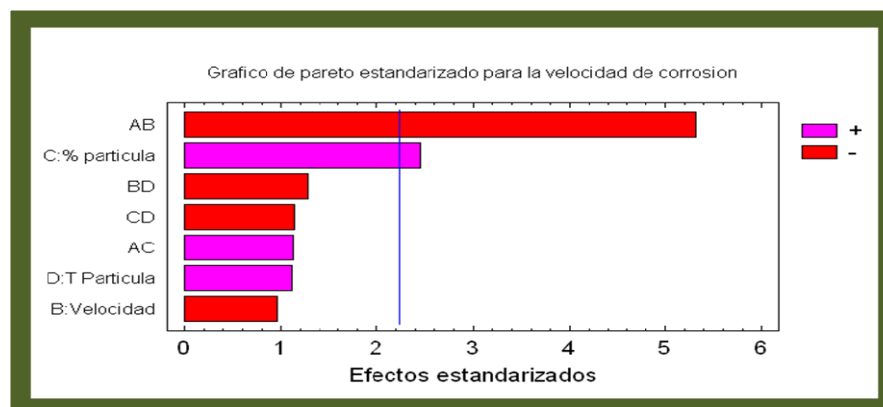


Figura 22. . Interacciones entre las variables (método de Pareto) sistema Salmuera-aceite mineral-SiO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> (corrosión – erosión).



Fuente: Los autores

En las figuras 23 y 24 muestran los efectos principales para la velocidad de corrosión, en estas se pueden ver la influencia de las variables independientes sobre la corrosión del acero.

Figura 23. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión (corrosión pura).

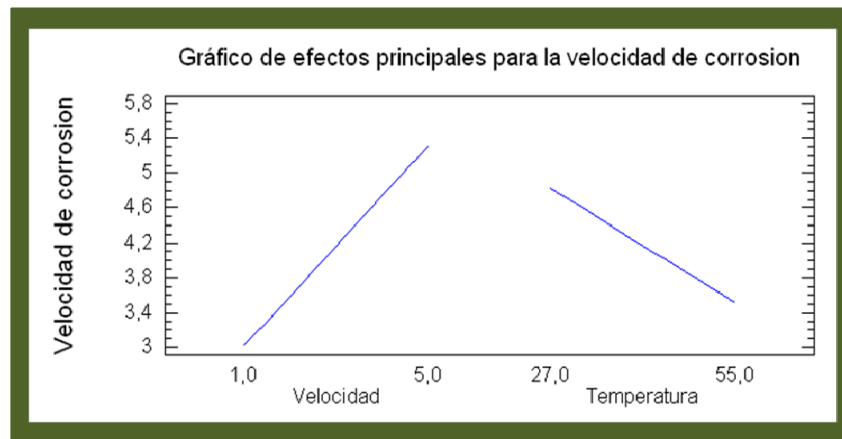
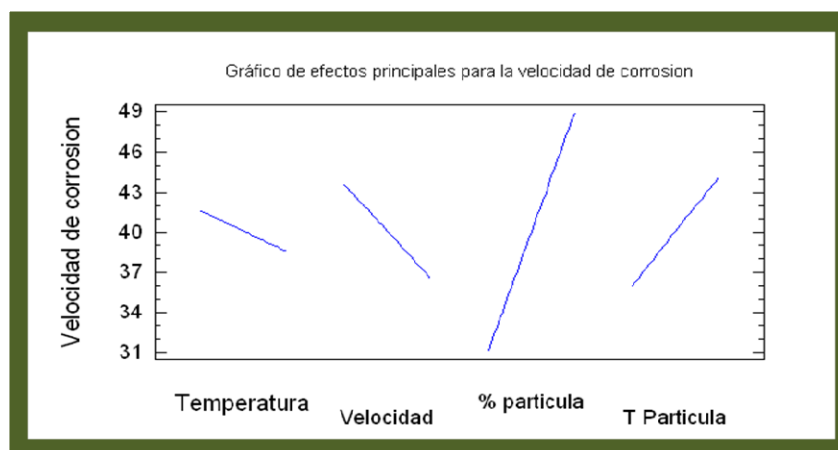


Figura 24. Gráfico de efectos principales para la velocidad de corrosión (corrosión-erosión).



Fuente: Los autores

En las gráficas anteriores de efectos principales para la variable respuesta  $V_{corr}$ , se observa para el caso de corrosión pura que la velocidad de corrosión es afectada por la velocidad de rotación, observándose también un grado de significancia con el la temperatura; y para el caso de corrosión – erosión la variable con más influencia en la velocidad de deterioro del acero es el porcentaje de partícula. Además en los anexos E, F, G, H se puede observar las graficas de la interacción de las variables para la velocidad de corrosión, los gráficos de probabilidad normal y los análisis de varianza para los sistemas con y sin partícula.

#### 5.4 ESFUERZOS DE CORTE

Los esfuerzos de corte fueron calculados con los datos de densidad, viscosidad, velocidad angular, número de Reynolds y utilizando la ecuación 8. (Ver tabla 14, 15 y 16).

$$\tau_w = 0,0794 Re^{-0,3} \rho r^2 \omega^2 \quad (8)$$

Donde:

$\tau_w$  = Esfuerzo de corte en la pared ( $N/m^2$ )

Re = Número de Reynolds [ $Re = (\rho U_p D) / \mu$ ]

$\rho$  = Densidad de la solución ( $kg/m^3$ )

r = Radio del cilindro rotatorio (m)

$\omega$  = Velocidad angular del electrodo (rad/s)

$U_p$  = Velocidad lineal del flujo en la tubería (m/s)

D = Diámetro de la tubería (m)

Tabla 14. Datos de viscosidad y densidad a diferentes temperaturas para la mezcla salmuera - aceite.

| TEMPERATURA (°C) | DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> ) | VISCOSIDAD (Cp) |
|------------------|-------------------------------|-----------------|
| 27               | 0,97075                       | 2,66            |
| 41               | 0,9884                        | 1,997           |
| 55               | 1,0061                        | 1,437           |

Tabla 15. Número de Reynolds a diferentes temperaturas.

| CONDICIONES | NUMERO DE REYNOLDS |
|-------------|--------------------|
| 1 m/s, 27 C | 4379,32            |
| 1 m/s, 55 C | 8401,67            |
| 3 m/s, 41 C | 17825,85           |
| 5 m/s, 27 C | 21896,6            |
| 5 m/s, 55 C | 42008,35           |

Tabla 16. Esfuerzos de corte.

| CONDICIONES | $\tau_w$ |
|-------------|----------|
| 1 m/s, 27°C | 2,4      |
| 1 m/s, 55°C | 2,1      |
| 3 m/s, 41°C | 15,7     |
| 5 m/s, 27°C | 41,3     |
| 5 m/s, 55°C | 35,2     |

| CONDICIONES                   | $\tau_w$ |
|-------------------------------|----------|
| 1 m/s, 27°C, 1%W, 50 $\mu$ m  | 2,4      |
| 1 m/s, 27°C, 1%W, 300 $\mu$ m | 2,4      |
| 1 m/s, 27°C, 9%W, 50 $\mu$ m  | 2,4      |
| 1 m/s, 27°C, 9%W, 300 $\mu$ m | 2,4      |
| 1 m/s, 55°C, 1%W, 50 $\mu$ m  | 2,1      |
| 1 m/s, 55°C, 1%W, 300 $\mu$ m | 2,1      |
| 1 m/s, 55°C, 9%W, 50 $\mu$ m  | 2,1      |
| 1 m/s, 55°C, 9%W, 300 $\mu$ m | 2,1      |
| 5 m/s, 27°C, 1%W, 50 $\mu$ m  | 41,3     |
| 5 m/s, 27°C, 1%W, 300 $\mu$ m | 41,3     |
| 5 m/s, 27°C, 9%W, 50 $\mu$ m  | 41,3     |
| 5 m/s, 27°C, 9%W, 300 $\mu$ m | 41,3     |
| 5 m/s, 55°C, 1%W, 50 $\mu$ m  | 35,2     |
| 5 m/s, 55°C, 1%W, 300 $\mu$ m | 35,2     |
| 5 m/s, 55°C, 9%W, 50 $\mu$ m  | 35,2     |
| 5 m/s, 55°C, 9%W, 300 $\mu$ m | 35,2     |

Fuente: Los autores

Los esfuerzos de cortes calculados para el sistema con partículas, no tiene ninguna diferencia a los calculados para el sistema sin partículas. Según la reología del sistema se esperaría un incremento en esta variable al adicionar las partículas, pero esta afirmación no se pudo comprobar debido a la falta de una ecuación ó correlación que relacione la influencias de las partículas en el fluido. Cabe anotar, que los resultados demostraron que sí hay una fuerte influencia de las partículas sólidas en el daño superficial de las capas de siderita formada

durante los ensayos; el esfuerzo de corte esta relacionado con la eliminación del oxido de la superficie debido a que existe una fuerte energía cinética para el procesomde remoción.

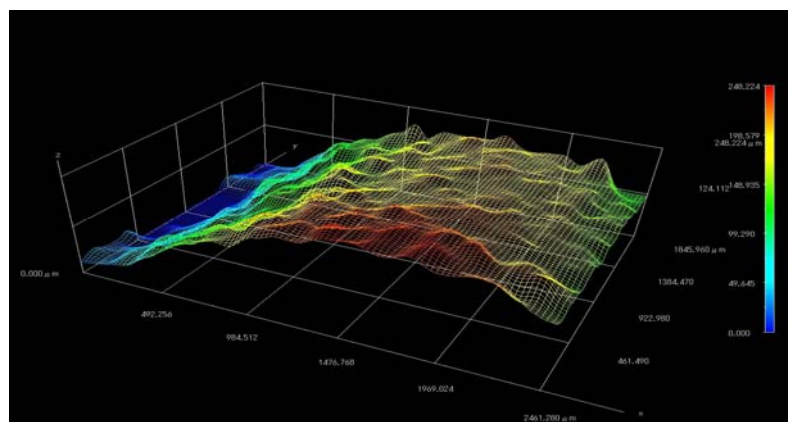
### 5.5 SUPERFICIE DE LA PROBETA DESPUES DEL ENSAYO.

En las fotografías 6 y 7 se observa la capa de productos de corrosión removida por las partículas que impactan sobre ella.

Fotografía 6. Superficie de la probeta después del ensayo sin partículas (corrosión pura).

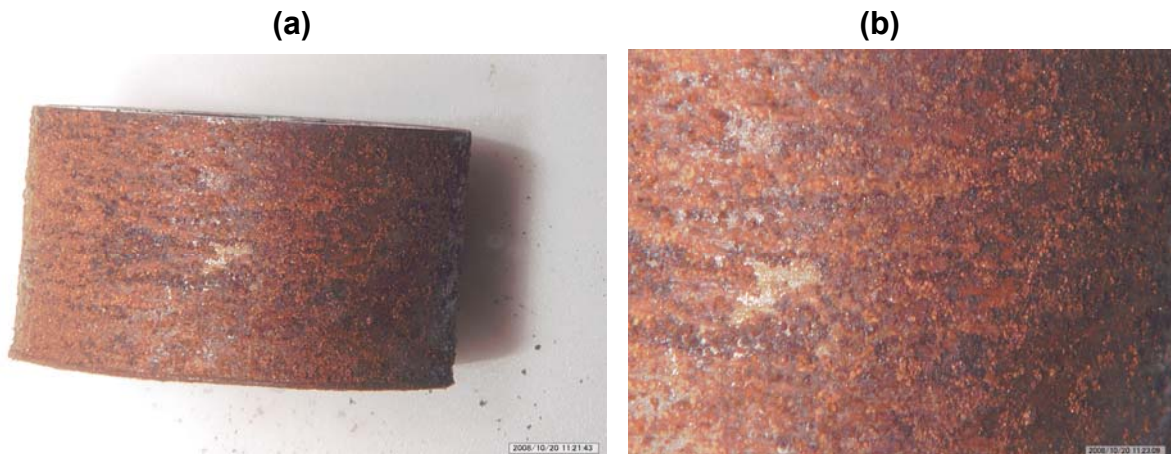


Fotografía 7. Análisis tridimensional de la superficie del material (corrosión pura).

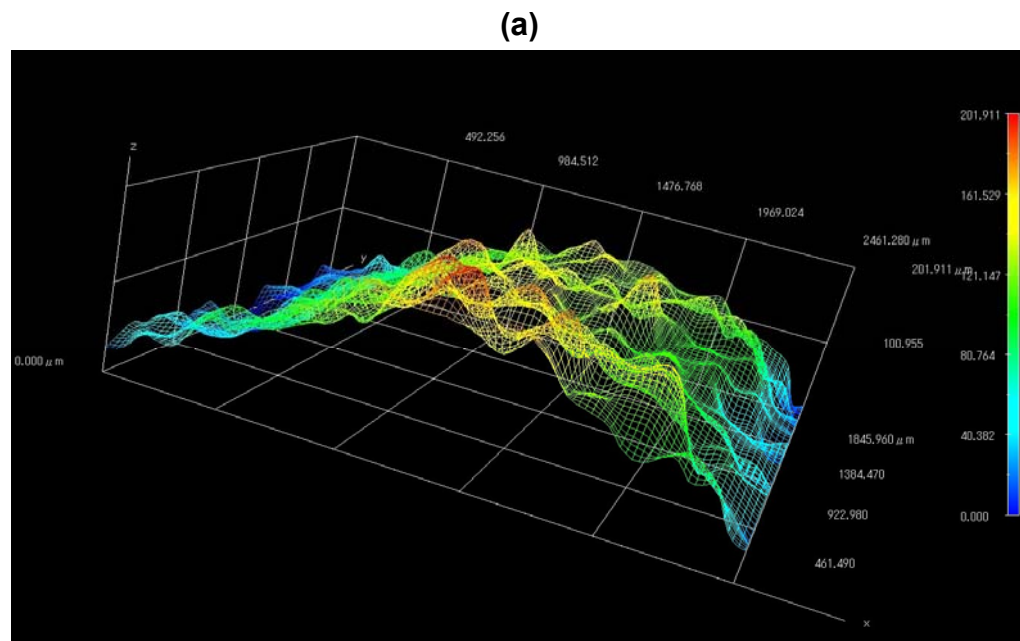


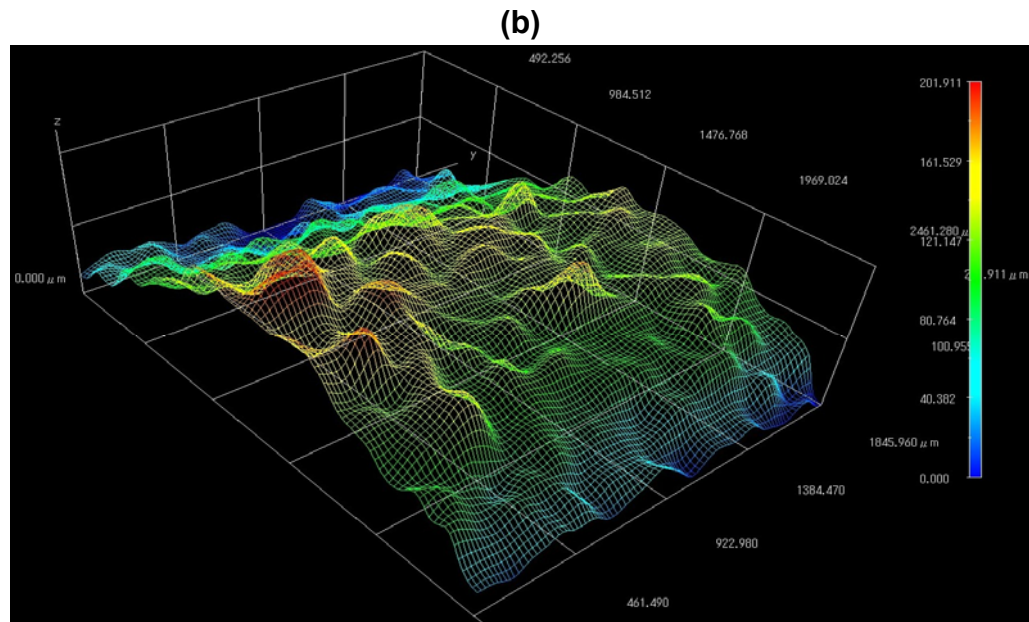
Fuente: Video microscopio digital 3D HYROX KH 7700 (Centro de biomateriales).

Fotografía 8. Superficie de la probeta después del ensayo con partículas (corrosión – erosión). (a) 25X (b) 50X



Fotografía 9. Análisis tridimensional de la superficie del material (corrosión – erosión). (a) Toma lateral (b) Toma superior.





Fuente: Video microscopio digital 3D HYROX KH 7700 (Centro de biomateriales).

En la fotografía 6 se observa la superficie de la probeta expuesta al sistema sin partículas (corrosión pura); muestra una capa de productos de corrosión homogénea. En la fotografía 8a y 8b se observa la superficie de la probeta expuesta al sistema con partículas (corrosión – erosión); donde se muestra el rompimiento de la capa de siderita formada; Además se observa que hay una corrosión generalizada.

Comparando la fotografía 7 que muestra el análisis tridimensional de la superficie para el sistema sin partículas con las fotografías 9a y 9b que es igualmente un análisis tridimensional para el sistema con partículas, se observa que la capa formada para el sistema sin partículas es mas homogénea debido a que no se presenta el fenómeno de erosión. También se observa en las figuras 7 y 9 la diferencia de espesor de la capa causado por el impacto de las partículas de sílice.

## 6. CONCLUSIONES

- En el sistema de estudio con adición de diferentes porcentajes de arena, la velocidad de deterioro del acero API 5L X65, está influenciada principalmente por el porcentaje de partícula y la interacción velocidad de rotación temperatura, y con una contribución menor del tamaño de partícula. El choque de las partículas contra la superficie del acero remueven la capa de siderita que se forma y que es protectora, de modo que la velocidad de corrosión aumenta con respecto al sistema sin partículas.
- Los valores de velocidad de corrosión obtenidos para los blancos, confirma el efecto de la velocidad de rotación y la temperatura sobre la velocidad de corrosión, comportamiento que se mantiene cuando se trabaja con diferentes porcentajes de partículas y se aumenta la velocidad del fluido. Se presenta una mayor velocidad de corrosión en el sistema con 9% de partículas a 1 m/s, 55 °C y 50  $\mu\text{m}$ , mientras a 1 m/s, 55 °C y 0% de partículas se obtuvo la velocidad de corrosión más baja.
- El producto de corrosión formado en el sistema con partículas bajo las condiciones de ensayo fue en su mayoría siderita no protectora, debido al impacto repetido de las partículas que originan el desprendimiento de dicha la capa, dejando la superficie del metal expuesta al ambiente corrosivo y aumentando la corrosión significativamente.

- Se afirma según el análisis estadístico de los resultados (Pareto, gráficos de interacción y gráficos de efectos principales) que los factores con efecto significativo para este sistema, son el porcentaje de partícula, la interacción temperatura - velocidad de rotación y la temperatura, esta última en menor magnitud.
- La forma de degradación del acero en este sistema fue corrosión asistida por erosión, cuya ecuación empírica fue:

$$V_{\text{corr}} = -58.0098 + 1.69743 \cdot \text{Temp} + 29.6758 \cdot \text{Vel} + 0.670692 \cdot \% \text{ part} + 0.129363 \cdot T \text{ part} - 0.687277 \cdot \text{Temp} \cdot \text{Vel} + 0.0728795 \cdot \text{Temp} \cdot \% \text{ part} - 0.018575 \cdot \text{Vel} \cdot T \text{ part} - 0.0082375 \cdot \% \text{ part} \cdot T \text{ part}$$

- Los valores de esfuerzo de corte encontrados indican que las partículas de sílice tienen la suficiente energía cinética para eliminar la gran mayoría de óxido formado sobre las probetas, a las diferentes condiciones de ensayos.

## 7. RECOMENDACIONES

- Puntualizar el sitio de trabajo de la tubería, ya que variables como temperatura, porcentaje de arena, tamaño de partícula varían de un yacimiento a otro, y así poder establecer condiciones individuales y no generalizar resultados.
- Realizar estudios similares incluyendo el H<sub>2</sub>S ya que este compuesto tiene una gran incidencia en el deterioro por corrosión de las tuberías transportadoras de crudo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

1. RAMAKRISHNA, M.; NESIC, S. and GULINO, D. Erosion Corrosion And Synergistic Effects In Disturbed Liquid-Particle Flow. Usa. 2006.
2. API RP 571. Damage Mechanisms Affecting fixed Equipment in the Refining Industry. American Petroleum Institute. First Edition, 2003.
3. SHADLEY, J.R.; et al. Prediction erosion-corrosion penetration rate in a carbon dioxide environment with sand. Corrosion Science. NACE 1998.
4. SCHMITT, Guenter. "Fundamental Aspects of CO<sub>2</sub> Metal Loss Corrosion Part II: Influence Of Different Parameters On CO<sub>2</sub> Corrosion mechanisms". Corrosion Nacexpo 2006 paper 06112. (2006).
5. WAARD, C. y MILLIAMS, D.E. "Prediction of carbonic acid corrosión in natural gas pipelines. Corrosión Volume 31. First int. Conferencas "internal and external protection of pipes. University of Durham, Held, September, 1975
6. ANDERKO, A. Simulation of FeCO<sub>3</sub>/FeS scale formation using thermodynamic and electrochemical models". Paper No 102, Corrosion international, 2000.
7. VINCENT, M.C., MILLER, H.B., MILTON, D. and KAUFMAN, P.B. Erosion by Proppant: A Comparison of the Erosivity of Sand and Ceramic Proppants

during Slurry Injection and Flowback of Proppant. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, Texas, U.S. 2004.

8. PEÑA, D. Introducción a la Erosión de Materiales. Artículo. Revista Ión, Centro de Estudios de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Vol. 17, No 1. 2001.
9. RAO, P.V. and BUCKLEY, D.H. Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based in their properties. Paper, Wear. Elsevier. 1985.
10. FINNIE, I. Erosion of Surfaces by Solid Particles. Paper. Wear, Vol. 3. 1960.
11. GOODWIN, J.E., SAGE, W. and TILLY, G.P. Study of erosion by Solid Particles. Proc. Of Inst. of Mech. Eng. Vol. 184. 1970.
12. STACK, M.M, JAMES J.S and LU, Q. Erosion-corrosion of chromium steel in a rotating cylinder electrode system: some comments of particle size effects. Corrosion, paper. Elsevier. 2003.
13. STACK, M.M, JAMES J.S y LU, Q. Erosion-corrosion of chromium steel in a rotating cylinder electrode system: some comments of particle size effects. Corrosion, paper. Elsevier. 2003.
14. GARCIA R. Monika, ARCHILA Edwin A. "Evaluacion de la corrosion del acero AISI-SAE 1020 Por medio de tecnicas electroquimicas en los sistemas hidrodinamicos: Salmuera – CO<sub>2</sub> – N<sub>2</sub> y Salmuera – H<sub>2</sub>S - N<sub>2</sub>", Trabajo de

grado Ingeniería metalúrgica. Universidad Industrial de Santander Bucaramanga Noviembre 2003.

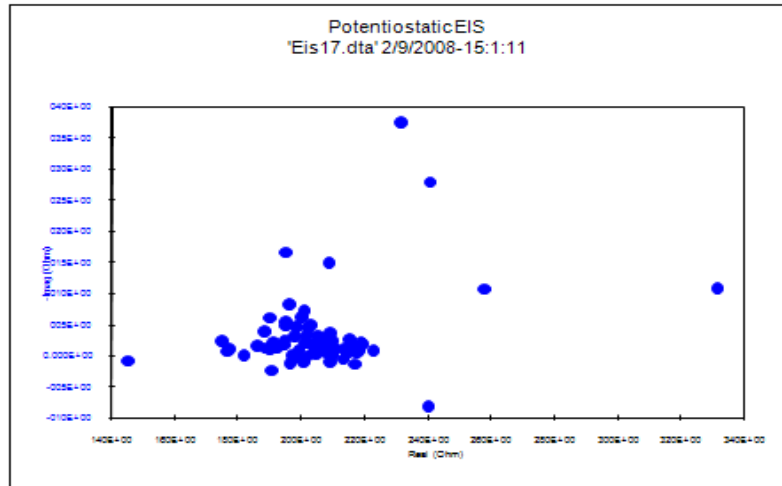
15. MACHUCA M. Jesús A. "Evaluación del daño por erosión – corrosión de un acero AISI-SAE 1020 por medio de técnicas electroquímicas, en un medio multifásico Salmuera-CO<sub>2</sub>-Arena. Trabajo de grado de maestría en el área de ingeniería metalúrgica. Universidad industrial de Santander Bucaramanga 2007.

16. S. Nesic, B. Brown, "CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S corrosión under scale forming conditions". Corrosion NACE International. Paper no. 05625. 2005.

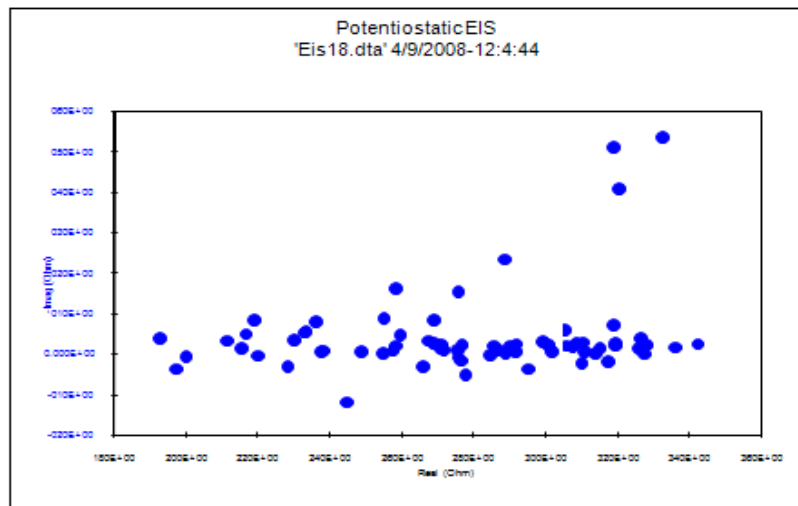
17. COTTIS Robert, TURGOOSE Stephen. "Electrochemical Impedance and Noise". NACE international. Series Editor. 1999.

## 9. ANEXOS

**Anexo A.** Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 1 y tamaños de partícula 50.

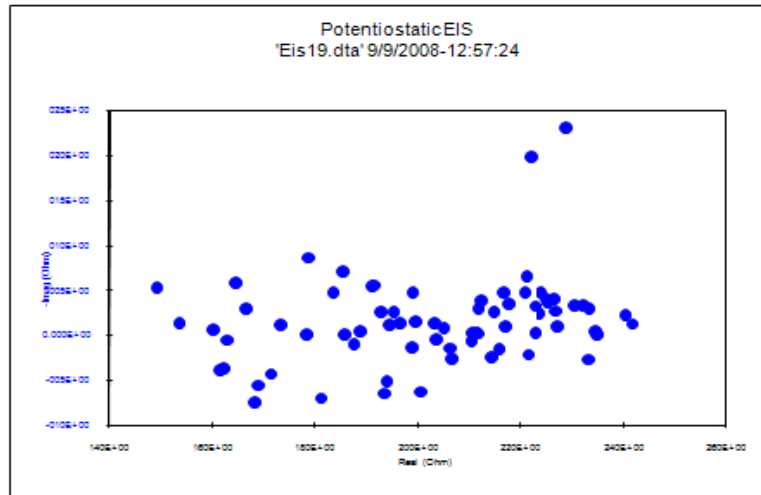


**Anexo B.** Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 1% y tamaños de partícula 300μm.

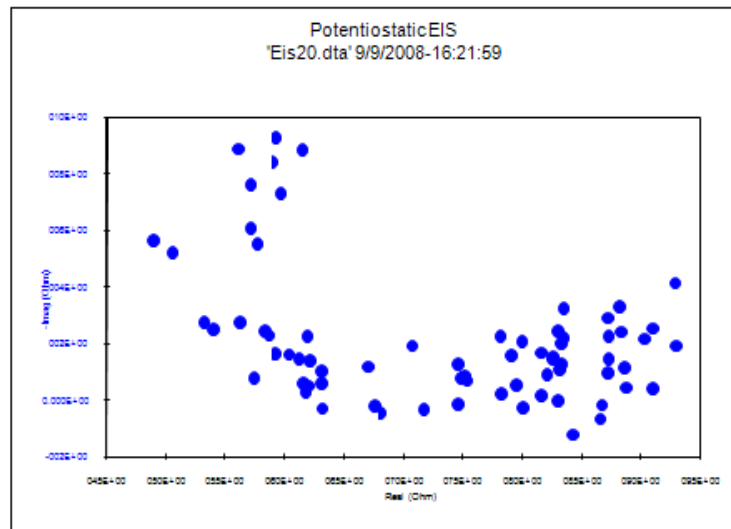


Fuente: Los autores

**Anexo C.** Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 9% y tamaños de partícula 50µm.

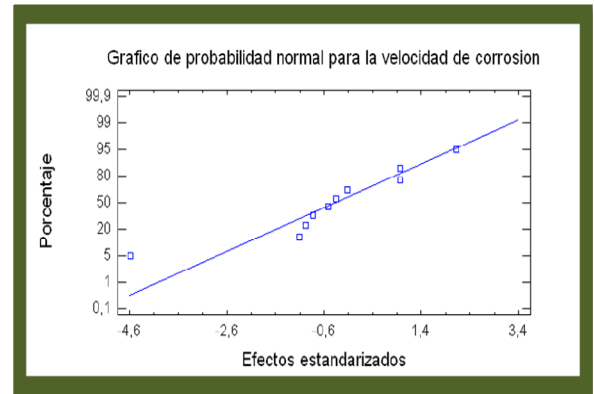
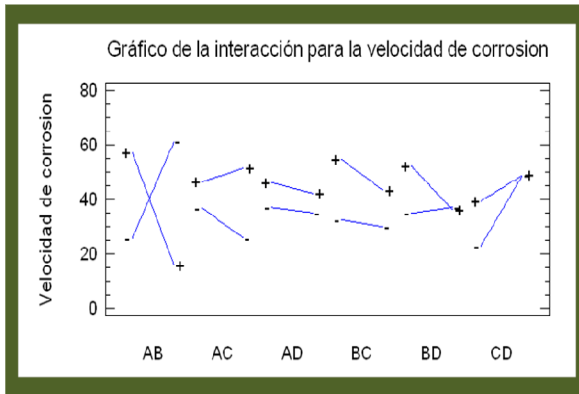


**Anexo D.** Diagrama de Nyquist a: Temperatura 55 °C, Velocidad 5 m/s, porcentajes de partícula 9% y tamaños de partícula 300µm.



Fuente: Los autores

**Anexo E.** Gráficos de la interacción para la velocidad de corrosión y probabilidad normal para la velocidad de corrosión.



Fuente: Los autores

**Anexo F.** Análisis de varianza para el sistema con partículas (corrosión-erosión)

| Fuente         | Suma de Cuadrados | Gl | Cuadrado medio | F-Ratio | P-Valor |
|----------------|-------------------|----|----------------|---------|---------|
| B: Velocidad   | 196,701           | 1  | 196,701        | 0,94    | 0,3556  |
| C: % partícula | 1258,48           | 1  | 1258,48        | 6,00    | 0,0343  |
| D: T Partícula | 263,251           | 1  | 263,251        | 1,26    | 0,2887  |
| AB             | 5925,15           | 1  | 5925,15        | 28,26   | 0,0003  |
| AC             | 266,506           | 1  | 266,506        | 1,27    | 0,2859  |
| BD             | 345,031           | 1  | 345,031        | 1,65    | 0,2285  |
| CD             | 271,426           | 1  | 271,426        | 1,29    | 0,2818  |
| Error Total    | 2096,81           | 10 | 209,681        |         |         |

Total (corr) 10623,3 17

R-cuadrado = 80,2623 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 66,4459 por ciento

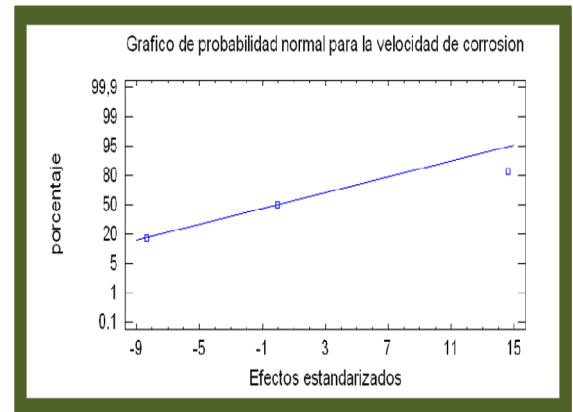
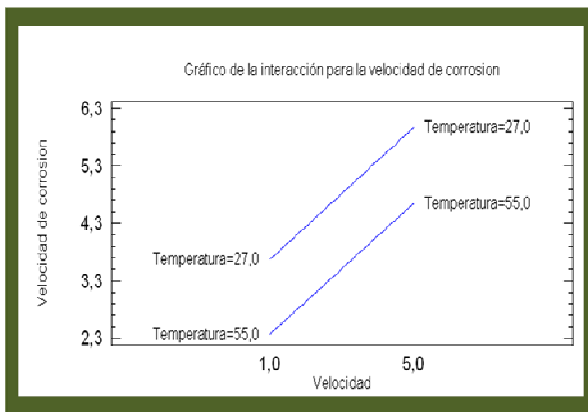
Error Estándar de Est. = 14,4804

Error absoluto de la media = 8,41528

Estadístico Durbin-Watson = 1,80049 (P=0,4763)

Auto correlación residual Lag 1 = -0,0223035

**Anexo G.** Gráficos de la interacción para la velocidad de corrosión y probabilidad normal para la velocidad de corrosión.



**Anexo H.** Análisis de varianza para el sistema sin partículas (corrosión pura)

R-cuadrado = 99,6492 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,597 por ciento

Error Estándar de Est. = 0,156525

Error absoluto de la media = 0,056

Estadístico Durbin-Watson = 1,25

Auto correlación residual Lag 1 = -0,05