

**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**

**ING. JESÚS AUGUSTO MACHUCA MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
POSGRADO EN INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA**

**2007**

**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**

**ING. JESÚS AUGUSTO MACHUCA MARTÍNEZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Magíster en  
Ingeniería – Área Ingeniería Metalúrgica**

**Director**

**DARÍO YESID PEÑA BALLESTEROS**

**Ing Metalúrgico M.Sc. Ph. D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
POSGRADO EN INGENIERÍA METALÚRGICA  
BUCARAMANGA**

**2007**

*A Dios por haberme permitido culminar una etapa más de mi vida.*

*A mi esposa Ana Milena y mi hija Ana Sofía por estar siempre presente en los grandes retos de mi vida y ser el motor para lograr mis éxitos.*

*A mis padres Cecilia y Jose Fidermán por que siempre han creído en mi.*

*A mis hermanos Fidermán, Josué y Torcoroma por su apoyo incondicional.*

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor realiza los más sinceros agradecimientos a:

Al profesor Darío Yesid por su paciencia, colaboración y confianza para culminar este proyecto.

A la Dirección de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander por su apoyo económico.

Al profesor Gustavo Neira por facilitar la sílice para la realización de las pruebas de erosión corrosión.

A profesores y compañeros del Grupo de Investigaciones en Corrosión –GIC por acogerme en sus instalaciones.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. Preliminares .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.2.1 Objetivo general .....	2
1.2.2 Objetivos específicos .....	2
2. Fundamentos teóricos.....	4
2.1 Corrosión erosión en sistemas multifásicos .....	4
2.1.1 Factores críticos de la erosión-corrosión.....	9
2.2 Corrosión por CO <sub>2</sub> .....	10
2.2.1 Factores que afectan la corrosión por CO <sub>2</sub> .....	11
2.3 Erosión. ....	15
2.4 Técnicas electroquímicas para la evaluación de velocidades de corrosión .....	23
2.4.1 Pruebas potenciodinámicas .....	24
2.5 Hidrodinámica .....	30
2.6 Electrodo de cilindro rotatorio (ecr) .....	30
2.7 Transferencia de masa.....	31
2.7.1 Transferencia de masa en el electrodo de cilindro rotatorio (ecr).....	35
2.8 Esfuerzo de corte en la pared .....	35
2.8.1 Esfuerzo de corte en el electrodo de cilindro rotatorio (ecr).....	35
3. Metodología .....	37
3.1 Revisión bibliográfica .....	37
3.2 Recolección de información técnica .....	37
3.3 Determinación de variables.....	38
3.4 Adaptación y construcción de la celda para las pruebas de erosión-corrosión .....	38
3.5 Caracterización del sistema multifásico salmuera-CO <sub>2</sub> -arena.....	40

3.5.1 Material de trabajo .....	40
3.5.2 Solución inicial de trabajo.....	43
3.5.3 Caracterización de la arena .....	45
3.6 Diseño experimental estadístico.....	46
3.7 Realización de los ensayos de laboratorio .....	46
3.8 Análisis de resultados y conclusiones .....	48
3.9 Informe final.....	48
4. Resultados y análisis de resultados .....	50
4.1 Resultados etapa i: velocidad de erosión en ausencia de corrosión (erosión pura-keo). .....	50
4.1.1 Velocidad de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm .....	51
4.1.2 Velocidad de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm .....	53
4.2 Resultados etapa ii: velocidad de corrosión en ausencia de erosión (corrosión pura-kco). .....	58
4.3 Resultados etapa iii: velocidad de corrosión total en presencia de erosión - kc. ....	61
4.3.1 Velocidad de corrosión en presencia de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm.....	61
4.3.2 Velocidad de corrosión en presencia de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm.....	64
4.4 Resultados etapa iv: velocidad de erosión-corrosión total – ke-c. ....	67
4.4.1 Velocidad de erosión-corrosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm .....	68
4.4.2 Velocidad de erosión-corrosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm .....	68
4.5 Cálculo del efectos sinérgico del sistema salmuera-co <sub>2</sub> - arena a las diferentes velocidades de rotación. ....	71
4.6 Transferencia de masa y esfuerzos de corte.....	77
4.7 Ruido electroquímico .....	78

4.7.1 Ruido de voltaje electroquímico para el fenómeno de corrosión.....	79
4.7.2 Ruido de voltaje electroquímico para el fenómeno combinado de erosión- corrosión.....	80
5. Conclusiones .....	86
6. Bibliografía .....	88

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del desgaste por erosión .....	15
Figura 2. Efecto del ángulo de impacto en la velocidad de erosión.....	17
Figura 3. Velocidad de erosión en función de la velocidad de partículas de alúmina. ....	20
Figura 4. Mecanismos de erosión por ataque abrasivo a distintas morfologías.....	21
Figura 5. Morfología típica de partículas encontradas en la industria del petróleo y gas....	22
Figura 6. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución. ....	26
Figura 7. Diagrama de Impedancias de Nyquist indicando las diferentes resistencias de la solución, $R_s$ , de polarización, $R_p$ y de transferencia de carga $R_t$ . ....	27
Figura 8. SEM y EDS para la muestra de arena.....	45
Figura 9. Diagrama de metodología de la investigación.....	49
Figura 10. Velocidad de erosión a 1000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentración .....	52
Figura 11. Velocidad de erosión a 3000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentración. ....	54
Figura 12. Curvas de $R_p$ a diferentes velocidades de rotación. ....	59
Figura 13. Curvas Tafel a diferentes velocidades de rotación. ....	59
Figura 14. Diagramas de Nyquist a diferentes velocidades de rotación .....	60
Figura 15. Resistencia a la polarización a 1000 rpm .....	62
Figura 16. Diagramas de Nyquist a 1000 rpm .....	63
Figura 17. Curvas Tafel a 1000 rpm. ....	64
Figura 18. Resistencia a la polarización a 3000 rpm .....	65
Figura 19. Diagrama de Nyquist para 3000 rpm.....	66
Figura 20. Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 3000 rpm.....	67
Figura 21. Ruido de voltaje a una velocidad de 1000 rpm.....	79
Figura 22. Ruido de voltaje a una velocidad de 3000 rpm.....	80

Figura 23. Ruido de voltaje a 1000rpm, 10%W de partículas con un tamaño de 50µm.....	81
Figura 24. Ruido de voltaje a 1000rpm, 10%W de partículas con un tamaño de 150µm....	81
Figura 25. Ruido de voltaje a 1000rpm, 30%W de partículas con un tamaño de 50µm.....	82
Figura 26. Ruido de voltaje a 1000rpm, 30%W de partículas con un tamaño de 150µm....	82
Figura 27. Ruido de voltaje a 2000rpm, 20%W de partículas con un tamaño de 100µm....	83
Figura 28. Ruido de voltaje a 3000rpm, 10%W de partículas. ....	84
Figura 29. Ruido de voltaje a 3000rpm, 30%W de partículas. ....	84
Figura 30. Régimen de deterioro del acero al carbono 1020 .....	85
Figura 31. Mapa de desgaste del acero al carbono 1020.....	85

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Correlaciones para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa – ECR ....	35
Tabla 2. Variables para el proceso de erosión-corrosión .....	38
Tabla 3. Resultados de la composición química del acero AISI SAE 1020 .....	42
Tabla 4. Resultados de la Prueba de Dureza del acero AISI 1020.....	43
Tabla 5. Análisis Química por AAE de la muestra de Arena. ....	45
Tabla 6. Matriz para las pruebas de erosión pura.....	47
Tabla 7. Matriz para las pruebas de erosión-corrosión y corrosión asistida por erosión .....	47
Tabla 8. Matriz para las pruebas de corrosión pura. ....	48
Tabla 9. Resultados de los ensayos de erosión pura (I etapa).....	56
Tabla 10. Resultados de la velocidad de corrosión del acero AISI 1020 por las técnicas de corriente directa y alterna.....	60
Tabla 11. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena a 1000 rpm.....	64
Tabla 12. Velocidad de corrosión del sistema CO <sub>2</sub> -Salmuera-Arena a 3000 rpm.....	65
Tabla 13. Resultados de los ensayos de erosión-corrosión total a 1000 rpm.....	69
Tabla 14. Resultados de los ensayos de erosión-corrosión a 3000 rpm.....	69
Tabla 15. Componentes de la velocidad de erosión-corrosión total. ....	72
Tabla 16. Relación de las diferentes velocidades de deterioro. ....	73
Tabla 17. Corrientes límite, coeficiente de transferencia de masa y esfuerzo de corte obtenidas experimentalmente en el ECR. ....	77

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Celda de Erosión-Corrosión del GIC. ....	40
Fotografía 2. Probetas utilizadas en los ensayos. ....	41
Fotografía 3. Micrografía del acero AISI SAE 1020 .....	43
Fotografía 4. Superficie del acero después del ensayo (10%W, 50 $\mu$ m, 1000 rpm).....	53
Fotografía 5. Superficie del acero después del ensayo (30%W, 150 $\mu$ m, 3000 rpm).....	55
Fotografía 6. Fenómeno de corrosión en ausencia de erosión Kco.....	75
Fotografía 7. Fenómeno de corrosión-erosión a bajas velocidades de rotación .....	75
Fotografía 8. Fenómeno de erosión-corrosión a altas velocidades de rotación .....	76
Fotografía 9. Fractura de la siderita debido al impacto del erosivo .....	76

## RESUMEN

**TÍTULO: 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 \***

**AUTOR: MACHUCA MARTÍNEZ, Jesús Augusto.\*\***

**PALABRAS CLAVES:** Erosión-corrosión, Electrodo de cilindro rotatorio, Fluido multifásicos, Corrosión por CO<sub>2</sub>, Erosión, Técnicas electroquímicas.

### DESCRIPCIÓN:

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. 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.

La pérdida de peso causada por el fenómeno de erosión-corrosión no es igual a la suma de pérdida de peso de erosión y corrosión cuando los dos procesos actúan separadamente, la sinergia entre los procesos contribuye hasta en un 50%, en algunos casos como lo muestra la investigación realizada.

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 1000 y 3000 rpm, variando el tamaño de partícula entre 50µm y 150µm y la concentración de las mismas entre 10 y 30% donde se definieron 2 regímenes de erosión-corrosión: a bajas velocidades la contribución de la corrosión es la que controla el fenómeno, y al altas velocidades la erosión controla la degradación del sistema. Con los resultados obtenidos en la experimentación se construyó un mapa erosivo-corrosivo en el cual se estimó la severidad del medio sobre el acero estudiado.

---

\* Trabajo de grado

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

## ABSTRACT

**TITLE: EROSION-CORROSION EVALUATION OF A STEEL AISI-SAE 1020 BY ELECTROCHEMICAL TECHNIQUES, IN A MULTIPHASE BRINE-CO<sub>2</sub>-SAND SYSTEM\***

**AUTHOR: MACHUCA MARTÍNEZ, Jesus Augusto. \* \***

**KEY WORDS:** Erosion-corrosion, Rotating cylinder electrode (RCE), multiphase system, CO<sub>2</sub> corrosion, Erosion, electrochemical Techniques.

### DESCRIPTION:

In the production and transport of petroleum and gas many problems of corrosive type are presented, where the erosion - corrosion is one of the most important. Erosion-corrosion is a degradation process combined that it happens due to the chemical or electrochemical action, together 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, is already happening a corrosive process.

The mass loss caused by the phenomenon of erosion-corrosion is not the sum of erosion loss and corrosion when the two processes act separately, the synergy among those processes contribute up to 50%, as it was shown in this research.

The tests were carried out in a cell erosion-corrosion where the dynamic system was controlled by RCE with rotational speeds between 1000 and 3000 rpm, varying the particle size between 50 $\mu$ m and 150 $\mu$ m and its concentration between 10 and 30%. Two regimes were defined: erosion-corrosion which was defined at low speed, where the contribution of the corrosion is the controlling phenomenon, and the other one is at high speeds, where the erosion controls the degradation of the system. With the results obtained in the experimentation, an erosive-corrosive map was built, in which the severity of the damage on the studied steel was defined.

---

\* Research Work.

\*\* Faculty of Physical chemistry Engineering, Graduate degree in Metallurgical Engineering - Group of Corrosion Research. PhD. Darío Yesid Peña Ballesteros.

## **1. PRELIMINARES**

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

En las últimas décadas, tanto en Colombia como en el mundo se ha observado una gran preocupación por optimizar las diferentes actividades y procesos relacionados con la industria petrolera. Debido al incremento del precio del barril de crudo hoy en día se desea recuperar el petróleo que deja de brotar de forma natural de los pozos empleando diferentes técnicas como la inyección de vapor, gas ó agua a través de otros orificios de perforación, mejorando de esta forma las propiedades asociadas a la extracción del crudo y logrando un mejor aprovechamiento de los pozos.

El proceso de recuperación de crudo tiene una gran incidencia en el deterioro de los materiales empleados como es el caso de las líneas de tuberías involucradas en el transporte de fluidos provenientes de pozos de petróleo y gas. Estos fluidos contienen una gran cantidad de elementos como son: agua, partículas sólidas, sales disueltas y gases corrosivos entre otros.

Uno de los gases que más se utiliza es el CO<sub>2</sub> debido a que se disuelve fácilmente en algunos crudos y ocasiona una considerable reducción de la viscosidad dando al petróleo buenas propiedades de fluidez facilitando su extracción y recuperación, pero se han encontrado problemas en la producción del petróleo cuando éste ha sido inyectado debido a que los iones de dióxido de carbono disuelto en el agua pueden reaccionar con el acero al carbono de las tuberías.

En los campos petroleros el agua es el centro de funcionamiento puesto que se utiliza para la exploración, producción y transporte del petróleo. La mayor parte de estas industrias tiene asociada la producción de agua dentro de la cual se forma el ácido carbónico de

naturaleza débil formado por la interacción agua/ CO<sub>2</sub>, y adicionalmente estos fluidos arrastran partículas sólidas que aceleran aun más el proceso de deterioro del material.

El presente proyecto realizó un aporte al estado del arte en el país y la investigación sobre el conocimiento del proceso de erosión-corrosión con el fin promover posibles soluciones a la industria y contribuir al entendimiento de los fenómenos de erosión-corrosión por transporte de flujos multifásicos. Uno de los grandes aportes de esta investigación fue la construcción y puesta en marcha de una celda para ensayos de erosión-corrosión, única en el país, la cual permitió el fortalecimiento del conocimiento en esta área y la presentación de dos ponencias en eventos de carácter nacional.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo general**

Evaluar el daño ocasionado por el fenómeno combinado por la erosión y corrosión en un acero AISI-SAE 1020, por medio de técnicas electroquímicas, generado por el transporte de flujos multifásicos de salmuera-CO<sub>2</sub>-arena.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Determinar la velocidad de erosión-corrosión de un acero AISI-SAE 1020 por medio de técnicas electroquímicas de corriente directa y corriente alterna, en un Electrodo de Cilindro Rotatorio, bajo un flujo multifásico de salmuera-CO<sub>2</sub>-arena.

Determinar el posible mecanismo de erosión-corrosión en un acero AISI-SAE 1020, producido por el flujo multifásico de salmuera-CO<sub>2</sub>-arena, bajo condiciones hidrodinámicas establecidas.

Establecer la influencia de la transferencia de masa y esfuerzo de corte sobre la degradación de un acero AISI-SAE 1020 bajo condiciones hidrodinámicas controladas, por medio de técnicas electroquímicas de corriente directa y corriente alterna.

Construir un mapa de erosión-corrosión para un acero AISI-SAE 1020 expuesto a un flujo multifásico de salmuera-CO<sub>2</sub>-arena.

## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

### **2.1 CORROSIÓN EROSIÓN EN SISTEMAS MULTIFÁSICOS**

En la producción y transporte de petróleo se presentan muchos problemas de tipo corrosivo, donde la erosión-corrosión es uno de los más importantes, el cual no ha sido tratado y estudiado con detenimiento en el país. 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, las cuales son impactadas 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> Este fenómeno se caracteriza en su apariencia por la presencia de crestas, ondas, canales, huecos redondeados y generalmente por la existencia de una tendencia direccional.<sup>2</sup>

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

La experiencia ha demostrado que la pérdida de espesor de la pared de la tubería ocurre por un proceso de erosión-corrosión y este proceso es acelerado por una velocidad alta del fluido, (flujo turbulento), presencia de arena, contaminantes corrosivos como CO<sub>2</sub>, y por un mayor contacto entre el medio y el metal. Una manera de evitar el daño es el manejo de los fluidos a velocidades adecuadas, de acuerdo con el contenido de sólidos, para permitir el

uso de las aleaciones comunes de acero al carbono. Por mucho tiempo se ha venido utilizando una guía conocida como el API RP 14E, para estimar la velocidad máxima bajo la cual no se esperaría la erosión. La ecuación que permite calcular esta velocidad es la siguiente.<sup>4</sup>:

$$V_e = \frac{C}{(\rho)^{1/2}} \quad (1)$$

Siendo,

$V_e$  = la máxima velocidad permisible (pie/s)

$C$  = constante empírica (LbsKg/pie<sup>2</sup>s)

$\rho$  = densidad de la mezcla del fluido (lbsKg/pie<sup>3</sup>)

Para el caso de un flujo en dos fases, sin la presencia de sólidos, el valor recomendado de  $C$  es 100 para servicio continuo, y si contiene sólidos el valor debe ser mas bajo, el cual no se especifica en una guía. Probablemente mediante algunas pruebas experimentales se podría fijar este valor de  $C$ .

Existe cierta discusión en cuanto a las limitaciones de esta fórmula simple. Es una relación completamente empírica; la fórmula del API RP-14 se realizó inicialmente para usarla como pauta en la predicción de la erosión-corrosión en flujo multifásico de una tubería de acero al carbono sin inhibir. Debido a la carencia de modelos alternativos, se ha utilizado la fórmula para una variedad de sistemas seleccionando los valores de la constante a partir de la experiencia. Tales sistemas incluyen sistemas anticorrosivos, sistemas monofásicos, y aleaciones resistentes a la corrosión.

Investigadores a nivel internacional han realizado estudios avanzados que pueden ser utilizados como referencia para realizar un análisis sobre este proceso corrosivo que ataca los materiales y equipos utilizados en la industria petrolera nacional. Entre las

investigaciones más destacadas están las realizadas por la Universidad de Tulsa, la Universidad de Manchester (UMIST), la Universidad Federal de Río de Janeiro, el Instituto de Energía y Tecnología (IFE) y el SINTEF Petroleum Research, entre otros.

B. S. McLaury<sup>5</sup> ha propuesto varias ecuaciones que involucran factores como la hidrodinámica, variables geométricas y propiedades fisicoquímicas tanto de los fluidos como de los sólidos; no considerados en el API RP 14E, con base en datos experimentales para un flujo simple, anular y en software avanzado de dinámica de fluidos para trayectorias de partículas,

Heitz<sup>6</sup> estudió el efecto del flujo sobre la corrosión y sugirió 4 daños inducidos por el flujo del fluido: corrosión controlada por el transporte de masa, corrosión controlada por el transporte de fases, erosión-corrosión y cavitación-corrosión. La erosión-corrosión ocurre si el material es expuesto simultáneamente a la corrosión y a velocidades altas de flujo causando daños mecánicos. Las velocidades altas de flujo y turbulencia y/o la presencia de partículas sólidas, evitan la formación de capas protectoras, dejando el metal continuamente expuesto a ambientes corrosivos, acelerando así la velocidad de erosión-corrosión; Las diferentes geometrías, tales como válvulas y codos incrementan la velocidad de erosión-corrosión debido a los cambios en los regímenes de flujo.

Nesic, Bienkowsky y colaboradores<sup>7</sup>, estudiaron el fenómeno de erosión corrosión bajo condiciones de flujo turbulento en la geometría del cilindro rotatorio, llegando a la conclusión de que esta geometría crea condiciones de flujo similares a las observadas en campo, sustituyendo, en muchos casos, sistemas más complejos y costosos como el loop.

La pérdida de peso causado por el fenómeno de erosión-corrosión no es igual a la suma de pérdida de peso de erosión y corrosión cuando los dos procesos actúan separadamente. Por ejemplo, la erosión puede incrementar la velocidad de corrosión debido a la remoción de la película protectora, o la corrosión puede alternadamente inhibir la erosión si la película es

lo suficientemente dúctil para adsorber el impacto de las partículas, o mejorar la erosión por la disolución preferencial de algunas fases del material (sinergia) <sup>8</sup>

Es importante conocer cual es la pérdida de material causada por cada uno de los fenómenos independientes y su incremento por la influencia del otro para poder clarificar cual es el límite de transición del fenómeno combinado. Dichas relaciones indicará si la erosión o corrosión es el proceso de desgaste dominante y suministraría una información útil en la selección de materiales y prevención del fenómeno erosión-corrosión. <sup>9</sup>

La velocidad de corrosión puede ser determinada usando métodos electroquímicos como: polarización lineal, espectroscopia de impedancia electroquímica y extrapolación Tafel. Las medidas de corrosión en presencia de erosión también pueden ser calculadas usando los métodos mencionados sin embargo, las velocidades de erosión-corrosión medidas por estos métodos pueden ser inexactos porque requieren medidas de pérdidas de peso en periodos de tiempo muy cortos, y estos métodos pueden ser válidos solamente para sistemas de película lenta y no bajo condiciones de pasivación <sup>10</sup>

La velocidad de erosión-corrosión consiste de la suma de las contribuciones de las velocidades de erosión y corrosión y se puede expresar estas velocidades así:

$$K_{e-c} = K_e + K_c \quad (2)$$

$$K_e = K_{e0} + \Delta K_e \quad (3)$$

$$K_c = K_{c0} + \Delta K_c \quad (4)$$

Donde:

$K_{e-c}$ : Velocidad total de erosión corrosión

$K_e$ : Velocidad de erosión total en presencia de corrosión

$K_c$ : Velocidad de corrosión total en presencia de erosión

$K_{e0}$ : Velocidad de erosión en ausencia de corrosión

$K_{c0}$ : Velocidad de corrosión en ausencia de partículas

$\Delta KE$ : es el cambio en la velocidad de erosión afectado por corrosión

$\Delta Kc$ : es el cambio en la velocidad de corrosión afectado por erosión

Reemplazando las ecuaciones 3 y 4 en la 2 se tiene:

$$K_{e-c} = K_{eo} + K_{co} + \Delta Kc + \Delta KE \quad (5) \quad \text{ó}$$

$$K_{e-c} = K_{eo} + K_{co} + \Delta K_{e-c} \quad (6)$$

Donde:

$\Delta K_{e-c}$ : es el efecto sinérgico de erosión en la velocidad de corrosión y corrosión en la velocidad de erosión.

Conociendo los valores de velocidad de corrosión y erosión se puede establecer una relación para determinar los regímenes de erosión-corrosión para condiciones acuosas así<sup>9,11</sup>:

$$Kc/K_e < 0.1 \quad (7) \quad \text{Dominada por Erosión}$$

$$1 \geq Kc/K_e \geq 0.1 \quad (8) \quad \text{Erosión-Corrosión}$$

$$10 > Kc/K_e \geq 1 \quad (9) \quad \text{Corrosión-Erosión}$$

$$Kc/K_e \geq 10 \quad (10) \quad \text{Dominada por Corrosión}$$

Conociendo los rangos en los cuales se puede encontrar el fenómeno se ha desarrollado mapas de pérdida de material, llamados también mapas de control de procesos, los cuales facilitan la selección de materiales y el control de los procesos en las diferentes industrias donde se utilice este tipo de fluidos.

Los mapas de erosión-oxidación y más recientemente de erosión-corrosión, son un buen camino para identificar la criticidad de la interacción de diferentes parámetros. Los mapas de erosión-corrosión pueden ser interpretados de diferentes formas; Stephenson y Nicholls<sup>12</sup>, graficaron la velocidad de la partícula vs. espesor del óxido para un determinado tamaño de partícula y temperatura. Así mismo Stack y Peña<sup>13</sup>, graficaron la

velocidad vs. temperatura; en ambos casos se identificaron tres diferentes regiones de pérdida de peso: alta, media y baja. Los mapas de erosión-oxidación son de gran utilidad para determinar lo que sucederá cuando se cambian las condiciones de operación, en un determinado escenario.

Más recientemente se han desarrollado los mapas de erosión-corrosión que identifican las zonas de interacción, dependiendo de las contribuciones de las velocidades de corrosión y erosión, y de la naturaleza de los procesos de corrosión.

Stack, Corlett y Zhou<sup>14</sup>, desarrollaron una metodología para la construcción de mapas de erosión-corrosión en ambientes acuosos, demostrando el efecto del tamaño de partícula, flujo y pH de la solución.

**2.1.1 Factores Críticos de la Erosión-Corrosión.**<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 <sup>8</sup> :

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

Por consiguiente, la interpretación del comportamiento combinado de erosión-corrosión requiere de un conocimiento detallado de los fenómenos de erosión y corrosión. Si hay un efecto sinérgico, es importante aclarar: si el fenómeno de erosión es afectado por corrosión, el fenómeno de corrosión es afectado por erosión ó es una combinación de ambos.

## **2.2 CORROSIÓN POR CO<sub>2</sub>** <sup>[15,16,17,18]</sup>

La corrosión por CO<sub>2</sub> resulta de la reacción de la superficie del acero con ácido carbónico que se produce de la solución de CO<sub>2</sub> en una fase acuosa – no es una reacción directa con el

CO<sub>2</sub> gaseoso. El gas CO<sub>2</sub> seco no es por sí mismo corrosivo a temperaturas normales de transporte en sistemas de producción de gas y petróleo, pero cuando se disuelve completamente en una fase acuosa puede promover una reacción electroquímica entre el acero y la fase acuosa que lo contiene y es comúnmente llamada corrosión “dulce”.

Este tipo de corrosión está influenciada por un gran número de parámetros, entre los que se tiene la composición del fluido, el contenido de CO<sub>2</sub>, la temperatura, composición del acero, superficie del acero, morfología de la capa de óxido, dinámica del fluido, etc. Todos estos parámetros son independientes y pueden interactuar en diferentes formas para influenciar la corrosión por CO<sub>2</sub>.

### 2.2.1 Factores que afectan la corrosión por CO<sub>2</sub>

\* **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.

\* **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 cierta concentración y luego ésta se hace constante. Sin embargo hay autores como Anderko<sup>[19]</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; en este

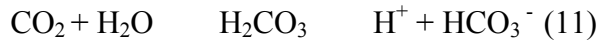
punto hay que tener en cuenta los factores que determinan la solubilidad del dióxido de carbono que son: la presión, la temperatura y la composición del agua. La solubilidad del dióxido de carbono en agua, se incrementa con el aumento en la presión y su correspondiente disminución de pH; recíprocamente, 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.

\* **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  $\text{CO}_2$  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  $\text{H}^+$  controla el proceso. Por el contrario, cuando el pH de la solución se encuentra en el intervalo entre 4 y 6, el proceso de transferencia de carga de ácido carbónico y bicarbonato controlan la corrosión. El incremento del pH disminuye la solubilidad del  $\text{FeCO}_3$ , 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  $\text{H}^+$ , y por lo tanto, disminuye la velocidad de la reacción de reducción del hidrógeno.

\* **Temperatura.** El efecto de la temperatura sobre la velocidad de corrosión de los aceros en soluciones que contienen  $\text{CO}_2$  es complicado debido a que ésta afecta la solubilidad del dióxido de carbono y el tipo de formación de productos de corrosión. Por lo tanto, el desarrollo de una relación directa puede únicamente ser realizada para casos con una aplicación específica en un rango limitado de temperatura de la solución y la presión parcial de  $\text{CO}_2$ .<sup>[20]</sup>

**Temperatura menor de 60°C.** El paso que controla la velocidad de corrosión es la evolución de hidrógeno, que a la vez es controlada por la formación de H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.



Si la temperatura es menor que 30°C la hidrólisis de CO<sub>2</sub> para formar ácido carbónico es la que controla la velocidad, si la temperatura es mayor de 40°C, la difusión de CO<sub>2</sub> o H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a la superficie llega a ser el paso que limita la velocidad. Las películas que se forman son delgadas y no muy protectoras. [21]

**Temperatura mayor de 60°C.** Esta condición de temperatura favorece la formación de depósitos que los que se forman a bajas temperaturas sobre la superficie afectada, así que la transferencia de masa (difusión) a través de ellos llega a ser el paso que controla la velocidad de corrosión. Para el acero al carbono alrededor de 100°C, se presenta una velocidad de corrosión máxima.

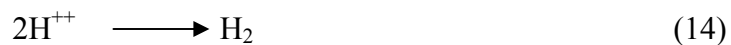
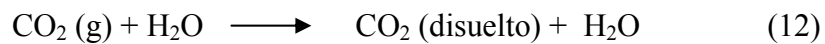
\* **Formación de capas.** En la corrosión de aceros al carbono y de baja aleación, en un ambiente húmedo con CO<sub>2</sub> se obtiene carbonato de hierro como producto de la reacción. Esta capa por debajo de los 60°C no es muy protectora, y por encima será más protectora, aumentando dicha característica 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

\* **Velocidad del fluido.** La velocidad del fluido tiene un efecto directo sobre la transferencia de masa de las diferentes especies. Una mayor velocidad del fluido acelerará el intercambio de especies entre el seno de la solución y la superficie metálica e igualmente los productos de corrosión son retirados hacia el interior de la solución.

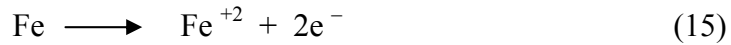
La velocidad media del flujo corrosivo afectan el número de Reynolds y esta influencia puede afectar la resistencia de la película. El esfuerzo de corte generado por el fluido en la superficie metálica o sólida es proporcional a una potencia del número de Reynolds. El esfuerzo de corte puede actuar sobre el espesor de precipitados sobre la superficie, el cual disminuye cuando este esfuerzo aumenta, aumentando por consiguiente la velocidad de corrosión. El esfuerzo de corte sobre la superficie puede afectar la constante de desorción y por lo tanto influenciar desfavorablemente el valor de adsorción.

Cuando los fenómenos predominantes en el proceso corrosivo se deben a las reacciones de transferencia de carga sobre la superficie, la influencia de la velocidad de fluido no es de mayor importancia. La combinación de varios efectos puede conducir a casos en los que la velocidad de corrosión disminuye al aumentar la velocidad del fluido, pero estos son casos excepcionales.

Entre la mayoría de los investigadores no existe un acuerdo sobre el mecanismo exacto de cómo ocurre la corrosión por CO<sub>2</sub>. Se han postulado varios mecanismos entre los cuales están los de De Waard y Williams, Schmitt, Nesic, entre otros; los cuales involucran ácido carbónico o el ión bicarbonato formado en la disolución del CO<sub>2</sub> en agua, esto conduce a velocidades de corrosión mayores que las esperadas para la corrosión en ácidos fuertes con el mismo pH. El CO<sub>2</sub> disuelto en agua produce ácido carbónico, un ácido débil comparado con los ácidos minerales que no se disocian completamente, este ácido carbónico, disminuye el pH de la solución, e incrementa su corrosividad. Los siguientes son algunos de los pasos de la reacción con ácido carbónico<sup>[17,22]</sup>:



Este ácido ataca al hierro formando un carbonato de hierro y el efecto de corrosión es directo sobre la tubería y las instalaciones del gasoducto o poliducto:



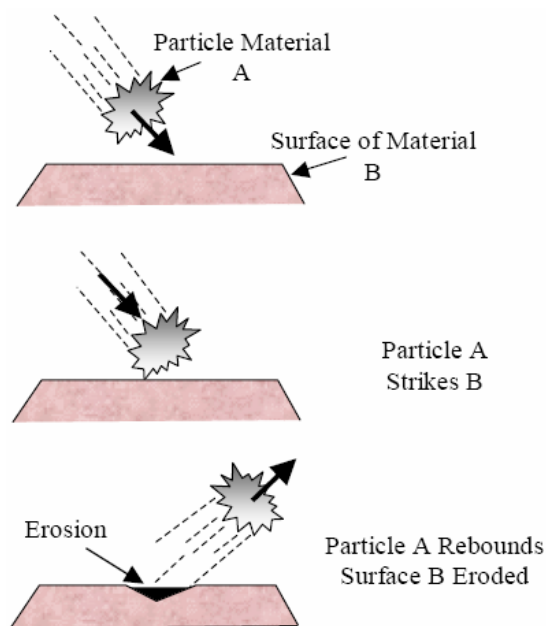
Reacción global:



### 2.3 EROSIÓN.<sup>[53]</sup>

La erosión es el proceso de desgaste mecánico ocasionado por el impacto de partículas sólidas sobre la superficie de un material (figura 1), lo que determina su capacidad para resistir los esfuerzos de corte a los que es sometido cuando entra en contacto con ellas. El impacto constante de partículas contra la superficie crea 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>[23]</sup>

Figura 1. Esquema del desgaste por erosión



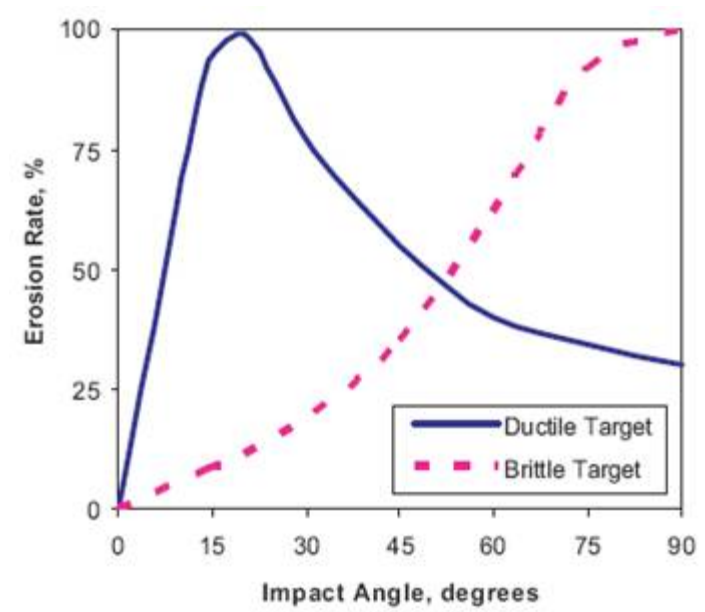
*Fuente: Vincent et al (23).*

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>[24]</sup>.

Existen dos tipos de respuesta de un material frente al fenómeno erosivo, éstas son: dúctil y frágil. La principal diferencia entre estos es la manera en la cual la velocidad de erosión varía con el ángulo de impacto. Para materiales frágiles la máxima erosión se obtiene a impactos normales mientras que para materiales dúctiles ésta ocurre a ángulos pequeños (figura 2).

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>[25]</sup>

Figura 2. Efecto del ángulo de impacto en la velocidad de erosión



Fuente: Vincent et al (23)

Levy [1985] investigó la erosión en aceros al carbono y aleaciones de aluminio, y encontró que los materiales que mostraron los valores de dureza y resistencia más altos, presentaron de igual forma las más altas velocidades de erosión. Se piensa entonces que las aleaciones más dúctiles disminuyen la erosión a través de la distribución de la energía cinética de las partículas por medio de la deformación plástica en la región de la zona de impacto, reduciendo así la concentración de esfuerzos en los puntos de impacto y aminorando a su vez el mecanismo de daño. Asimismo la ductilidad, como medida de la capacidad de elongación, está más íntimamente relacionada con la resistencia a la erosión que otras propiedades mecánicas de los materiales.<sup>[26]</sup>

La transferencia de masa es sin duda un parámetro importante para entender fenómeno erosivo, por lo que es esencial establecer un factor que contribuya a desarrollar una mejor relación de las variables involucradas en el proceso; es así como se ha descubierto que bajo condiciones de erosión, el coeficiente de transferencia de masa es incrementado por:

La remoción de depósitos en la superficie.

El incremento en la turbulencia a partir del paso de partículas a través de la capa límite.

El aumento de la rugosidad resultado de la erosión.

El efecto de la erosión es progresivo, el daño ocasionado aumenta a medida que más y más partículas sólidas entran al sistema. Además, la forma y angularidad de las mismas juegan un papel definitivo en el mecanismo de deterioro.

**2.3.1 Parámetros que afectan la Erosión.** El conocimiento de todos y cada uno de los factores que afectan el proceso de erosión es esencial principalmente cuando se intenta desarrollar un modelo apropiado para el proceso erosivo.

Las variaciones en las propiedades físicas, químicas y mecánicas, así como en el comportamiento dinámico, tanto del material que causa como del que sufre la erosión, deben ser consideradas. Los principales factores que afectan la erosión son enunciados a continuación:

1. Concentración de partículas.
2. Velocidad del fluido (velocidad de impacto de las partículas).
3. Ángulo de impacto.
4. Tamaño de las partículas.
5. Morfología de las partículas
6. Densidad, dureza y fragilidad de las partículas.
7. Naturaleza del fluido.
8. Tipo de flujo.
9. Naturaleza del material de trabajo.

La influencia de los primeros cinco factores sobre la velocidad de erosión es muy fuerte y cualquier cambio en ellos puede afectar drásticamente la velocidad de deterioro del material.<sup>[27]</sup>

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

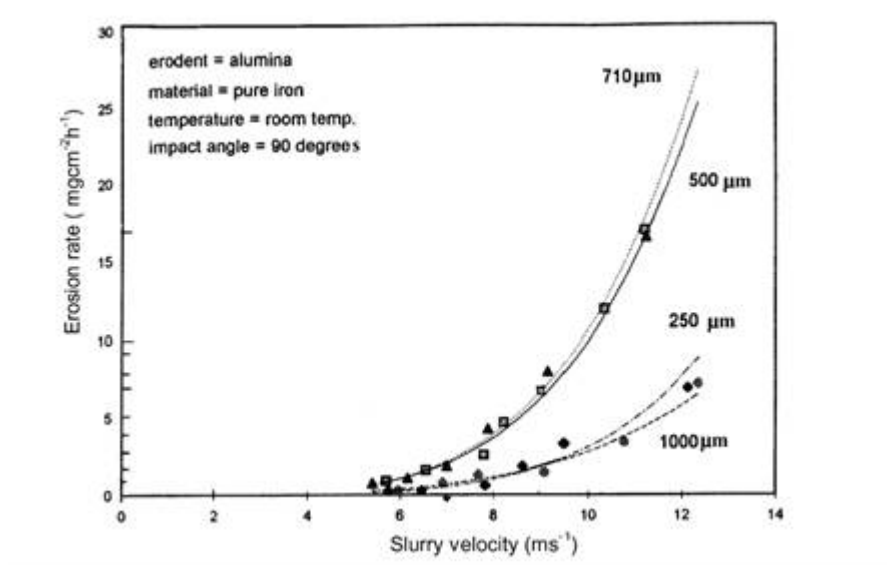
$$\varepsilon = b V^n \quad (17)$$

Donde V es la velocidad de las partículas y n corresponde al valor de 2 a 2,3<sup>[28,29]</sup>

Bitter [1963] reportó que hay una velocidad límite por debajo de la cual no ocurre erosión, estos valores calculados por el autor son muy bajos (menos de 10 pies/s) los cuales se consideran no deberían ser ignorados.<sup>[30]</sup>

La figura 3 muestra la velocidad de erosión como función de la velocidad de impacto para varios tamaños de partículas de alúmina a ángulos normales de impacto sobre una probeta de hierro puro a temperatura ambiente.

Figura 3. Velocidad de erosión en función de la velocidad de partículas de alúmina.



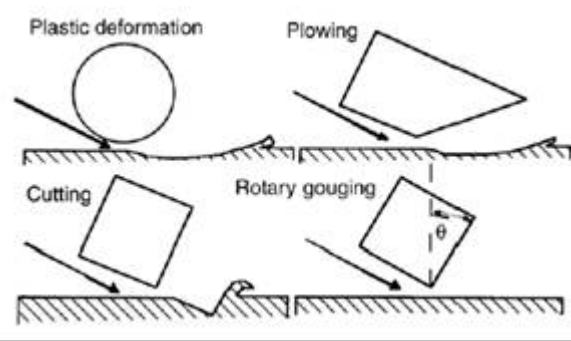
Fuente: Pungwiwat (31)

\* **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>[32]</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.

En materiales frágiles, el mayor daño ocurre cuando se concentra la energía de impacto en un pequeño punto. Abrasivos de borde redondeado intensifican la energía en un punto de contacto muy pequeño, mientras que abrasivos labrados en facetas pueden distribuir la energía sobre un área más grande, dependiendo de la orientación en el momento del impacto. En materiales dúctiles, las partículas redondeadas pueden penetrar ligeramente la superficie, creando cráteres sin liberación de material desde la superficie.

En la figura 4 se muestran los mecanismos de erosión en materiales dúctiles por ataque abrasivo, de acuerdo a ciertas formas de partículas, que incluyen deformación plástica, corte, surcado (plowing) y estriado (rotary gouging).

Figura 4. Mecanismos de erosión por ataque abrasivo a distintas morfologías.



Fuente: Vincent et al (23)

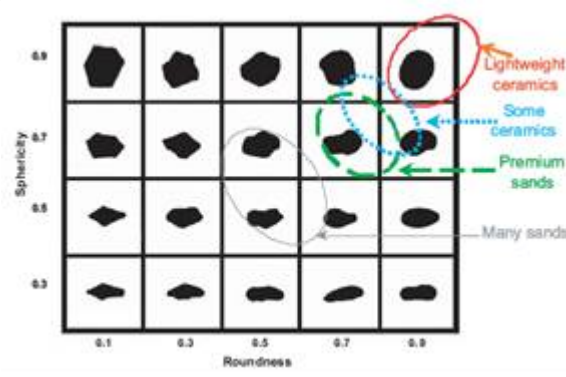
Brown y colaboradores (1981) encontraron que la remoción de material ocurre por la deformación a los lados de las “colinas” y la eliminación de las escamas del material desde los “valles”. Se observó que la penetración considerable de arena juega un papel importante en la extracción de material en los “valles”, con formación adicional de una capa de metal-arena en la superficie.<sup>[33]</sup>

Como es de esperarse, y ayudados por la confirmación de resultados aportados por la literatura, las partículas angulares proporcionan una mayor velocidad de erosión que las partículas esféricas. H. Mcl. Clark (1991) demostró que una suspensión de partículas de arena de cuarzo produce erosión en aceros cuarenta veces más que usando suspensiones de partículas de vidrio de la misma masa y tamaño.<sup>[34]</sup>

El grado de angularidad se puede cuantificar por medio de análisis de imagen y sus efectos sobre la energía de impacto han sido discutidos por Hattori y Nakao [2001], que encontraron que dicha energía incrementa en un factor de 2 a 3 con la angularidad, la cual se ha encontrado también que varía con el tamaño de grano.<sup>[35]</sup>

La figura 5 muestra las formas típicas de los erodentes mas frecuentes en la industria del gas y del petróleo.

Figura 5. Morfología típica de partículas encontradas en la industria del petróleo y gas.



Fuente: Vincent et al (23)

\* **Ángulo de impacto.** El ángulo de incidencia o el ángulo de ataque de las partículas sobre la superficie de un material influye 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). Muchos investigadores han reportado este comportamiento general, como se observó en la figura 2.

\* **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 partícula mayores a 100  $\mu\text{m}$ , la dependencia de la velocidad de erosión se reduce considerablemente.<sup>[36]</sup>

\* **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.

\* **Temperatura.** Young y colaboradores [1977] reportaron varios efectos de la temperatura sobre la velocidad de erosión.<sup>[37]</sup> Ellos demostraron que existe un gran incremento en la velocidad de erosión de un acero inoxidable tipo 310 cuando la temperatura aumentó de 25°C a 975°C. En un posterior estudio del efecto de la temperatura sobre la velocidad de erosión, Hockey y colaboradores [1978] demostraron la ocurrencia de procesos de deformación plástica durante la erosión de materiales frágiles.<sup>[38]</sup>

Adicionalmente, la experiencia ha mostrado que la influencia de la temperatura en la velocidad de erosión, en ausencia del fenómeno corrosivo, no es tan simple como podría esperarse, debido a la disminución de la resistencia del material con el incremento de la temperatura. Por otro lado, Sundarajan y colaboradores (1990) encontraron que en ciertos casos, la velocidad de erosión aumentó bajo la influencia de la temperatura, mientras que en otros casos, disminuyó.<sup>[39]</sup>

## 2.4 TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS PARA LA EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN <sup>[15,16,17,18]</sup>

Las técnicas electroquímicas son las más utilizadas para determinar velocidades y mecanismos de corrosión en pruebas de simulación desarrolladas en laboratorio. Estas técnicas se dividen básicamente en técnicas de corriente directa y técnicas de corriente

alterna, unas con ciertas ventajas con respecto a las otras, pero a la vez todas suministran información necesaria para entender con mayor precisión el fenómeno de corrosión.

15,16, 41-45

**2.4.1 Pruebas potenciodinámicas.** En las pruebas potenciodinámicas el electrodo de trabajo es monitoreado a través de un rango de potenciales donde se mide la corriente resultante. El potencial controlado se aplica entre el electrodo de trabajo y el de referencia desde una fuente externa, y la corriente es medida entre el electrodo de trabajo y los electrodos auxiliares. Las curvas obtenidas son analizadas según la norma técnica ASTM G5.

- **Curvas de polarización:** en las curvas de polarización se aplica un barrido de potencial de menos a más 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.

Este método desarrollado en principio por Evans y Wagner, exige hacer las curvas de polarización completa, lo cual facilita un análisis electroquímico del proceso de corrosión y da lugar a modificaciones en la superficie del electrodo por las elevadas polarizaciones.

- **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,  $E_{corr}$ .

$$R_p = (dE/di)_{E=E_{corr}} \quad (18)$$

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 potencióstato un sobrepotencial de 20mV 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:

$$i_{corr} = [B_a * B_c / (2.3 (B_a + B_c))] / R_p \quad (19)$$

$$i_{corr} = [b / 2.3] / R_p \quad (20)$$

Donde:

$I_{corr}$  = Densidad de corriente de corrosión [ A/cm<sup>2</sup> ]

$b_a$  = 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 [ k \*cm<sup>2</sup> ]

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

$$V_{\text{corr}} = 0.13 i_{\text{corr}} \text{ PE} / \quad (21)$$

$$V_{\text{corr}} = 0.0895 i_{\text{corr}} \text{ PE} \quad (22)$$

Donde:

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

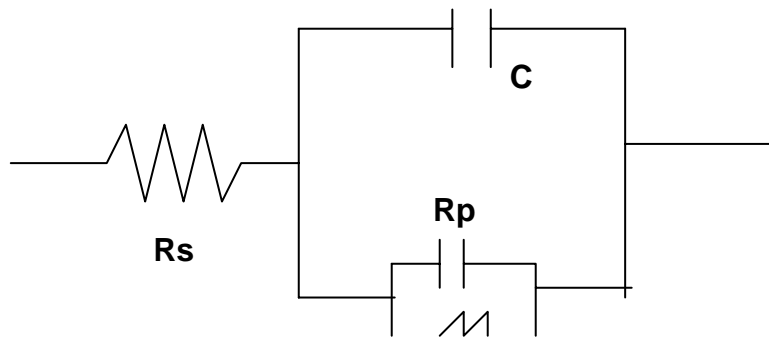
PE = Peso específico del material [ g ]

= Densidad del material [ g/cm<sup>3</sup> ]

- **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 de voltaje de 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 6.

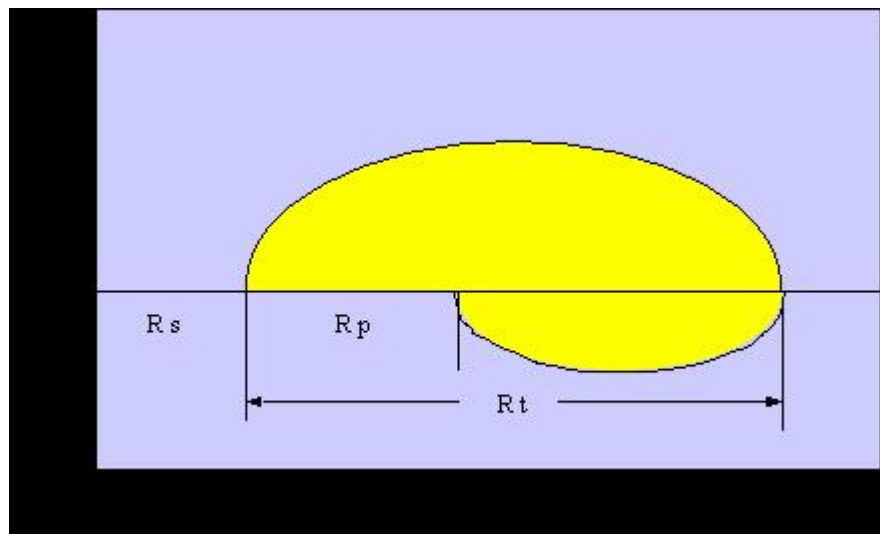
Figura 6. Circuito equivalente que simula la interfaz metal-solución.



La interfaz electroquímica se representa como un condensador (doble capa) en paralelo con la impedancia Faradaica  $R_T$ , además se incluye una resistencia en serie  $R_e$  (resistencia del electrolito). Mediante la técnica de espectroscopia de impedancias se pueden determinar los valores de resistencia a la transferencia de carga, que se puede sustituir en la ecuación de Stern-Geary, al igual que en la técnica de resistencia a la polarización lineal, y obtener un valor de la velocidad de corrosión.

En un diagrama de Nyquist como el que se observa en la figura 7, que se obtiene en una evaluación con la técnica EIS, se muestran tres resistencias. La resistencia  $R_s$ , como la resistencia en ohmios de la solución, la resistencia a la polarización lineal  $R_p$ , y la resistencia  $R_t$  de la transferencia de carga. En este caso específico, de la presencia de tres resistencias, no existe un acuerdo entre los autores en la bibliografía de cual resistencia seleccionar entre  $R_p$  y  $R_t$  para calcular la velocidad de corrosión.<sup>[17]</sup>

Figura 7. Diagrama de Impedancias de Nyquist indicando las diferentes resistencias de la solución,  $R_s$ , de polarización,  $R_p$  y de transferencia de carga  $R_t$ .



Fuente: Villareal, J. (17)

- **Ruido electroquímico.**<sup>[48]</sup> De todas las técnicas electroquímicas, el ruido electroquímico presenta el mayor potencial para ser usado exitosamente, en la medición de las velocidades de corrosión general y localizada presente en los equipos industriales. Esta técnica fue estudiada a finales de la década del 70 y comienzo de los 80 como un medio para detectar la corrosión localizada, así como el ataque por picado, rendijas y cavitación.

El ruido es un término común que significa sonido no deseado, en términos científicos es aquello que no puede ser explicado con relación a la variabilidad de las mediciones obtenidas en un experimento.

El ruido electroquímico en potencial se define como las oscilaciones estocásticas del potencial electroquímico de un electrodo respecto a un electrodo de referencia, mientras que el ruido electroquímico en corriente es la oscilación estocástica de una corriente electroquímica. La idea es que eventos electroquímicos aleatorios sobre la superficie de un metal en corrosión, generan ruido en las señales de potencial y de corriente. Cada tipo de corrosión, por ejemplo, corrosión general, corrosión por picadura, corrosión por rendijas, corrosión bajo esfuerzos, tendrán una “huella” ó “firma” en la señal de ruido. Esta “huella” se puede utilizar para predecir el tipo y la severidad de ataque corrosivo que se está presentando<sup>[49]</sup>.

Las características del ruido electroquímico varían con el tiempo, debido a esto la señal de ruido electroquímico se considera una señal no estacionaria. La mayor información se obtiene de las oscilaciones a baja frecuencia (menores a 10 Hz). La amplitud de las oscilaciones es pequeña, presentando una desviación estándar del orden de  $\mu\text{V}$  a  $\text{mV}$  para ruido electroquímico en potencial y de  $\eta\text{A}$  a  $\mu\text{A}$  para ruido electroquímico en corriente. El límite inferior de sensibilidad está determinado por el ruido del instrumento. Las oscilaciones de potencial y corriente para períodos más cortos de tiempo, conforman el verdadero ruido electroquímico, pero aún así las propiedades del ruido cambiarán con el paso del tiempo cuando la película de productos de corrosión se desarrolle.

- Medición del ruido electroquímico (ECN). Los datos de ECN usualmente se determinan midiendo las fluctuaciones de corriente  $\Delta I$  entre dos electrodos del mismo material que se encuentran conectados entre sí por un amperímetro de resistencia cero y las fluctuaciones de potencial se mide entre dos electrodos acoplados y un electrodo de referencia estable.

Para el monitoreo de la corrosión el electrodo de referencia puede ser reemplazado por un tercer electrodo del mismo material. El ancho de banda  $\Delta f = f_{\max} - f_{\min}$  de la medida de ECN (ECNM) está dado por la frecuencia de muestreo,  $f_s$ , que determina la máxima frecuencia  $f_{\max}$ , y el tiempo medido  $t$  que determina la mínima frecuencia,  $f_{\min}$ . En el laboratorio comúnmente se usa una frecuencia de muestreo de 2 puntos/seg. y  $t = 1024s$ . El ancho de banda para ECN está limitado a altas frecuencias por el ruido de la instrumentación, mientras que el tiempo necesario para la toma de datos de ECN, a muy bajas frecuencias, lo limita la  $f_{\min}$ .

El análisis de las señales de ECN se puede clasificar en una variedad de métodos: visual, independiente de la secuencia, dependiente de la secuencia. El examen visual de la hoja registrada en el tiempo puede dar indicación del tipo de proceso corrosivo que esta ocurriendo. El análisis estadístico de las señales de ruido, indica que los datos de ruido generados durante la corrosión general tienen una distribución relativamente Gaussiana normal y mostrará pocos transitorios rápidos.

En contraste, el proceso de corrosión localizada tal como el picado y la corrosión bajo esfuerzos tiene transitorios en el trazado registrado en el tiempo y tiene características que ayudan a distinguirse entre ellos. La corrosión localizada conduce a la desviación de una distribución normal (distribución de Poisson) y puede ser determinada por la asimetría (skewness) y la kurtosis de las señales. Otros medios de identificar la corrosión localizada involucra el uso del índice de localización (L.I).

Los principales problemas experimentales en las medidas de ruido electroquímico son el rumbo ó tendencia de la señal y la asimetría de los electrodos usados para el desarrollo del experimento.

## **2.5 HIDRODINÁMICA** <sup>[16,52]</sup>

El patrón de flujo a lo largo de una geometría dada está gobernado por las leyes de la hidrodinámica. Para los fluidos Newtonianos, tales como la mayoría de los líquidos, la velocidad de campo está dada por la ecuación de Navier-Stokes, la cual representa la conservación del momento y por la ecuación de continuidad basada en la ley de conservación de la masa.

En el caso de flujo en tubería, se pueden distinguir varios tipos de flujo: laminar, turbulento, unido y separado, de acuerdo con sus recorridos a través de las paredes sólidas. El flujo laminar está caracterizado por líneas de flujo paralelas. La turbulencia se describe como un flujo inestable que contiene fluctuaciones rotacionales y tridimensionales. Estas fluctuaciones son aleatorias en el tiempo y el espacio.

En los últimos años la investigación se han enfocado en el flujo multifásico. Un caso típico de este tipo de flujo se encuentra en la producción de gas y petróleo donde hay 4 fases presentes: hidrocarburo condensado, formación de agua, gas y lodo (partículas erosivas).

## **2.6 Electrodo de cilindro rotatorio (ECR)** <sup>[16,52]</sup>

El sistema de prueba ECR es compacto, relativamente económico, y controlable fácilmente. Provee un flujo estable y reproducible en volúmenes de fluido relativamente pequeños. Opera en régimen turbulento sobre un amplio rango de números de Reynolds, bajo condiciones hidrodinámicas controladas y conocidas. Los experimentos requieren pequeñas cantidades de fluido, y se pueden hacer simultáneamente mediciones electroquímicas y

gravimétricas. Es esencial que el electrodo de trabajo pueda ser rotado, tanto a altas como bajas velocidades, y que esta última variable pueda ser medida y mantenida constante.

Un cilindro rotatorio causa turbulencia del fluido debido al arrastre de la superficie. La extensión dependerá de la geometría exacta, particularmente el grado de desviación. El flujo laminar ocurre a bajas velocidades de rotación, por ejemplo, 10 rpm., y el Re crítico es de aproximadamente 200.

En este equipo se desarrollan 3 regímenes de flujo:

A bajas velocidades rotacionales el flujo es laminar y tangencial.

Sobre un valor crítico en función de  $(Re, d_o, d_i)$ , continua el régimen laminar, pero se desarrollan los vórtices de Taylor dando un movimiento radial y axial.

Sobre un valor crítico de Re, se desarrolla la turbulencia total.

En el ensayo del electrodo de cilindro rotatorio se rota una muestra del material metálico de forma cilíndrica a una velocidad controlada en el medio corrosivo bajo investigación. La transición de flujo laminar a turbulento ocurre a muy bajas velocidades de rotación, y las condiciones hidrodinámicas definidas matemáticamente son producidas a través de la superficie del electrodo.

## **2.7 TRANSFERENCIA DE MASA** <sup>[16,52]</sup>

Básicamente, la transferencia de masa puede ser descrita de la siguiente manera: los iones y moléculas pueden alcanzar la superficie del metal por difusión molecular como resultado de un gradiente de concentración. Los reactantes también pueden ser transportados por convección (debido al flujo laminar o turbulento), la cantidad de materia que alcanza la superficie se incrementa y de igual manera la velocidad de reacción. Esta clase de transporte se conoce como difusión convectiva. Como lo dice su nombre, consiste de convección en el seno de la solución y difusión en la vecindad inmediata de la superficie.

La difusión convectiva se expresa matemáticamente por una ecuación diferencial que incluye la primera ley de Fick y un término de convección donde  $n_i$  es el flujo másico molar del componente  $i$  ( $\text{mol}\cdot\text{m}^2/\text{s}$ );  $D_i$ , el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $c_i$ , la concentración ( $\text{mol}/\text{m}^3$ ), y  $u$ , la velocidad de flujo ( $\text{m}/\text{s}$ ).

$$n_i = - D_i \text{grad } c_i + u c_i \quad (23)$$

La ecuación establece que el flujo total es igual a la suma del transporte de masa difusional y transporte de masa convectivo. La velocidad en campo  $u$  se expresa por la ecuación de Navier-Stokes. Una solución analítica a la ecuación de difusión convectiva puede ser obtenida si las condiciones límite de las ecuaciones de Navier-Stokes no son tan complejas.

Para flujos turbulentos, se pueden usar combinaciones de grupos adimensionales, conocidos como correlaciones de transporte de masa:

$$\text{Sh} = a \text{Sc}^b \text{Re}^c \quad (24)$$

Esta ecuación relaciona los siguientes números adimensionales:

Número de Sherwood: Relación del transporte de masa total con el transporte de masa por difusión molecular.

$$\text{sh} = \frac{KL}{D} \quad (25)$$

Número de Reynolds: Relación de la fuerza de inercia con la fuerza de fricción.

$$\text{Re} = \frac{UL\rho}{\mu} = \frac{U L}{\nu} \quad (26)$$

Número de Schmidt: Relación del transporte de momento con el transporte de masa por difusión molecular.

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{\nu}{D} \quad (27)$$

Donde:

$K$  = coeficiente de transferencia de masa (m/s)

$D$  = Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s)

$L$  = longitud característica (m)

$U$  = Velocidad característica (m/s)

$\mu$  = viscosidad (Kg /m s)

$\rho$  = Densidad (Kg / m<sup>3</sup>)

$\nu$  = viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)

$a, b, c$  = constantes

La transferencia de masa es determinante en el proceso de corrosión. Debido a las reacciones electroquímicas que toman lugar en la superficie del metal, las concentraciones de varias especies en la superficie del metal son diferentes a la del seno de la solución. Como un resultado de este gradiente de concentración en el fluido, hay un movimiento de las especies del seno de la solución a la pared de la tubería y viceversa. Para calcular el flujo de transferencia de masa de las especies es necesario calcular los coeficientes de transferencia de masa de las especies.

La ecuación empírica de Chilton-Colburn para transferencia turbulenta es la siguiente:

$$K_{mt} = \frac{f Re D Sc^{1/3}}{8d} \quad (28)$$

Donde:

$K_{mt}$  = coeficiente de transferencia de masa de las especies

$Re$  = número de Reynolds

Sc = número de Schmidt

D = difusividad de las especies en el fluido

f = factor de fricción de Moody

d = diámetro de la tubería

Así, como la ecuación anterior, existen expresiones semi-empíricas, semi-analíticas, desarrolladas por diversos autores para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa. A nivel de laboratorio se puede medir la velocidad de transferencia de masa, mediante la técnica de corriente de difusión límite electroquímica. Es una técnica versátil y aproximada para la investigación de la transferencia de masa. Consiste en que mediante la polarización del electrodo de trabajo, se acelera el proceso electroquímico hasta que el transporte de las especies involucradas a la superficie del metal llega a ser la velocidad limitante. El proceso de transporte depende principalmente de la difusión a través de la capa límite la cual es una función de los parámetros de flujo. Cuando el electrodo de trabajo se polariza adecuadamente, la corriente límite medida es directamente proporcional a la velocidad de transferencia de masa.

El coeficiente de transferencia de masa se calcula de la corriente límite, usando la siguiente ecuación:

$$K = \frac{I_L}{nFAC_b} \quad (29)$$

Donde:

K = coeficiente de transferencia de masa

IL = corriente límite

n = número de moles que reaccionaron

F = constante de Faraday's

A = área superficial del electrodo

Cb = concentración de la solución

**2.7.1 Transferencia de masa en el electrodo de cilindro rotatorio (ECR).** La tabla 1 muestra las correlaciones matemáticas establecida por varios para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa validas únicamente para régimen de flujo turbulento.

Tabla 1. Correlaciones para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa – ECR<sup>[52]</sup>

Propiedad	Autor	Correlación
Transferencia de masa	Eisenberg y colaboradores	$Sh = 0,0791 Re^{0,7} Sc^{0,356}$
	Newman	$Sh = 0,0791 [Re(R_1/R_2)]^{0,7} Sc^{0,356}$
	Wranglen y colaboradores	$Sh = 0,0791 Re^{0,67} Sc^{0,33}$

## 2.8 ESFUERZO DE CORTE EN LA PARED<sup>[52]</sup>

La transferencia de momento de un fluido en movimiento hacia una superficie sólida sobre la cual está fluyendo y el grado de turbulencia del fluido en la superficie sólida se expresa como el esfuerzo de corte en la pared ( $\tau_w$ ).

Este parámetro es una medida directa de la pérdida de energía viscosa dentro de la capa límite turbulenta, y está relacionado con la intensidad de la turbulencia en el fluido actuando en la pared. No es una fuerza en la pared del tubo sino una fuerza del fluido en movimiento en la pared.

**2.8.1 Esfuerzo de corte en el electrodo de cilindro rotatorio (ECR)** Para el electrodo de cilindro rotatorio en la región turbulenta existe la siguiente correlación desarrollada por Silverman:

$$\tau_w = 0,0794 \text{ Re}^{-0,3} \rho r^2 \omega^2 \quad (30)$$

Donde:

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

Re = Número de Reynolds

$\rho$  = Densidad de la solución (kg/m<sup>3</sup>)

r = Radio del cilindro rotatorio (m)

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

El esfuerzo de corte en la pared y la transferencia de masa para flujo turbulento están relacionadas. Ellas no se pueden separar experimental o matemáticamente para la evaluación de la corrosión acelerada por el flujo. Este vínculo no es totalmente independiente de la geometría, sin embargo, la relación entre los parámetros puede diferir de una geometría de flujo a otra.

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología que se empleó en el desarrollo de la investigación “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” fue diseñada para obtener una mayor información acerca de los procesos multifásicos erosivos-corrosivos que se pueden presentar en la industria del petróleo y gas, para lo cual se tuvo en cuenta las siguientes etapas:

#### **3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En esta primera etapa se realizó una revisión del estado del arte, correspondiente a conceptos, principios y mecanismos de erosión-corrosión causados por el transporte de fluidos multifásicos. Además, se revisaron las investigaciones realizadas sobre este fenómeno, los estudios sobre esfuerzos de corte y transferencia de masa en este tipo de fluidos multifásico y los equipos utilizados a nivel de laboratorio para su evaluación.

Esta búsqueda se efectuó en los diferentes medios especializados como libros, revistas, normas, artículos e Internet. Además en la base de datos de la biblioteca central de la Universidad Industrial de Santander que es una de las más completas del país.

#### **3.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA**

La búsqueda y recolección de esta información se realizó directamente con datos de campo, referentes a materiales, variables de flujo e hidrodinámica del fluido y tipo de partículas que se transportan en dichos fluidos, que son manejados en las diferentes áreas de producción y transporte de crudo. Estos datos se utilizaron para fijar los parámetros y establecer las variables de simulación en el laboratorio.

### 3.3 DETERMINACIÓN DE VARIABLES

Con la información recolectada del punto anterior se determinaron los valores de las variables críticas en los procesos en los cuales se observa este fenómeno de erosión – corrosión, para luego adecuar en el laboratorio estos ambientes y poder determinar el posible mecanismo producido por el fluido multifásico de salmuera-CO<sub>2</sub>-arena, y su influencia sobre la velocidad de erosión-corrosión del acero AISE SAE 1020 bajo estas condiciones. La tabla 2 presenta las variables definidas para el desarrollo de las pruebas de laboratorio que influyen en el proceso de erosión-corrosión.

Tabla 2. Variables para el proceso de erosión-corrosión

Equipos	Pruebas	Velocidad de rotación (rpm)	Relaciones de Presión	T °C	% W Arena	% NaCl	Objetivos
Electrodo de Cilindro Rotatorio	R.P Impedancia Pendiente Tafel	1000 (2.5m/s) 2000 (4.48 m/s) 3000 (6.5 m/s)	5%CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	27 2°C	10 20 30	3%	Velocidad de corrosión Velocidad de erosión Velocidad de erosión-corrosión Esfuerzos de corte Transferencia de masa Mapa erosión-corrosión
Microscopio óptico							Microestructura y tipo de daño
SEM							Capas formadas
DRX							Productos de corrosión

### 3.4 ADAPTACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE LA CELDA PARA LAS PRUEBAS DE EROSIÓN-CORROSIÓN

Para cumplir con los objetivos propuestos en el presente trabajo fue necesario la construcción y adaptación de una celda para el Electrodo de Cilindro Rotatorio (ECR) en el laboratorio del Grupo de Investigaciones en Corrosión en la sede UIS-Guatiguará, (ver Fotografía 1-a), el cual consta de 3 partes principales, el cuerpo, los baffles y el eje.

El cuerpo o coraza está fabricado de acrílico con una capacidad de 200 ml, el cual contiene un acople en la sección media donde se puede articular el electrodo de referencia; en su parte inferior se encuentran dos entradas para el suministro de gas como se puede observar en la fotografía 1-b.

Los baffles están ubicados en la tapa del cuerpo, (la cual dispone de un compartimiento en la parte superior para situar el contraelectro de platino - esta disposición es para que las partículas erosivas no tengan ningún efecto sobre éste) y la disposición de estos cuatro baffles es concéntrica a lo largo de la celda como se puede ver fotografía 1-c.

La función de estos cuatro baffles es garantizar un flujo turbulento y minimizar el efecto de vórtice producido por el giro de la probeta, además de orientar las partículas hacia el centro donde está ubicada la muestra o probeta de trabajo.

El eje está fabricado en acero inoxidable y recubierto con teflón; en el cual se ajusta el espécimen de trabajo; en la base del eje se encuentran una serie de aspas con el propósito de evitar la sedimentación de las partículas de arena durante el ensayo (ver fotografía 1-d).

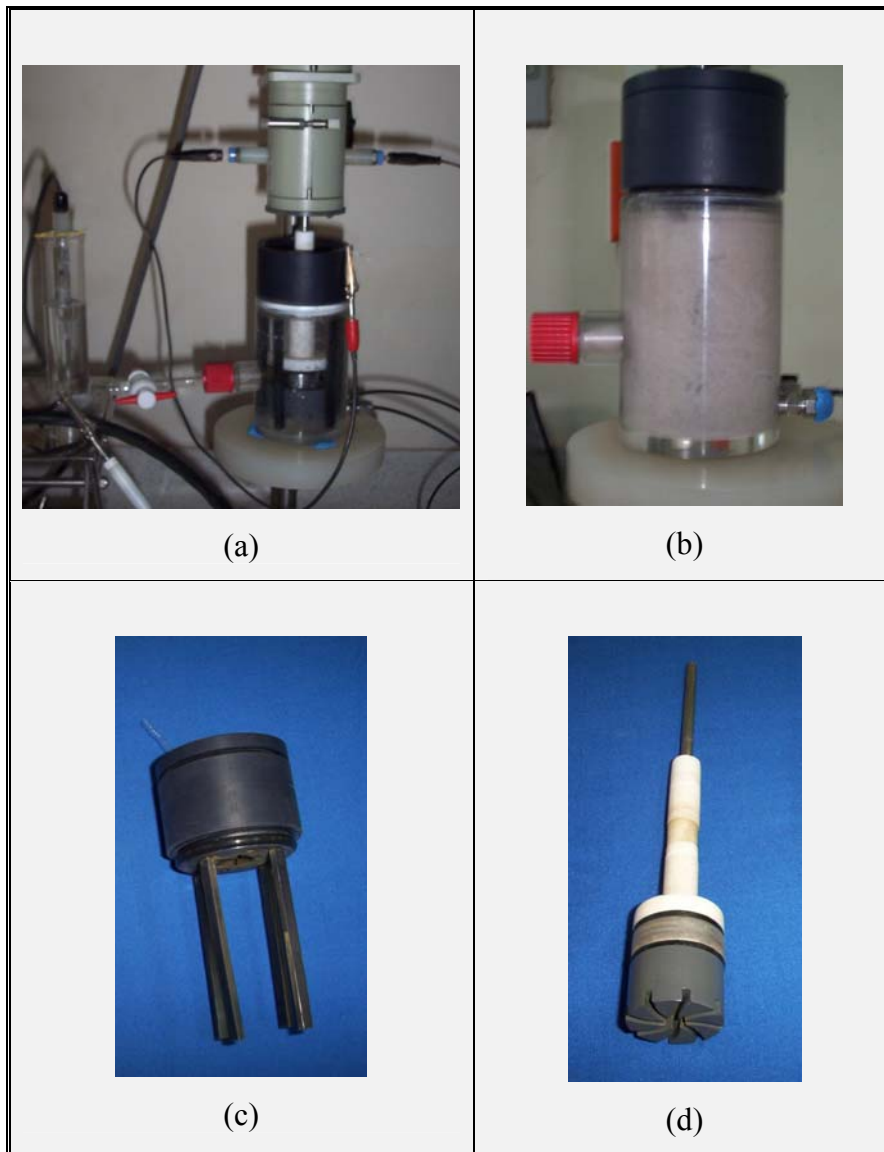
Este conjunto es ensamblado y montado en el electrodo de cilindro rotatorio, el cual es un equipo de ensayos dinámicos con velocidad de rotación variable fotografía 1-a.

Para la realización del diseño se recurrió a estudios realizados anteriormente.<sup>[10,11,32]</sup> Cabe anotar que la construcción de esta celda fue un punto clave para el desarrollo del proyecto ya que es la primera de su tipo en el país para el estudio de este fenómeno.

### 3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA MULTIFÁSICO SALMUERA-CO<sub>2</sub>-ARENA

**3.5.1 Material de trabajo.** El material para el desarrollo de esta investigación fue una barra de acero nuevo AISI SAE 1020, el cual fue maquinado para obtener probetas cilíndricas como se muestran en la fotografía 2, las cuales fueron sometidas a condiciones de erosión, corrosión y erosión- corrosión.

Fotografía 1. Celda de Erosión-Corrosión del GIC.



Para la realización de los ensayos, las pruebas fueron llevadas a un acabado superficial con papel de carburo de silicio N° 600, limpiadas con agua y detergente, luego desengrasadas con un disolvente (etanol) y por último se les realizó una limpieza en un baño ultrasónico.

Antes de realizar las pruebas preliminares y finales de la investigación se realizó la caracterización completa del material utilizado para fabricación de las probetas, con el propósito de evitar conclusiones erradas por composición o elementos fuera del rango.

Los ensayos a realizados para caracterizar el material fueron:

- Análisis químico
- Análisis metalográfico
- Dureza

Fotografía 2. Probetas utilizadas en los ensayos.



Fuente: Autor del proyecto

\* **Análisis Químico.** El material fue sometido a la técnica de Espectroscopia de Emisión Óptica – EEO de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E-415. los resultados del ensayo se muestran en la tabla 3 junto con los valores permitidos para este acero.

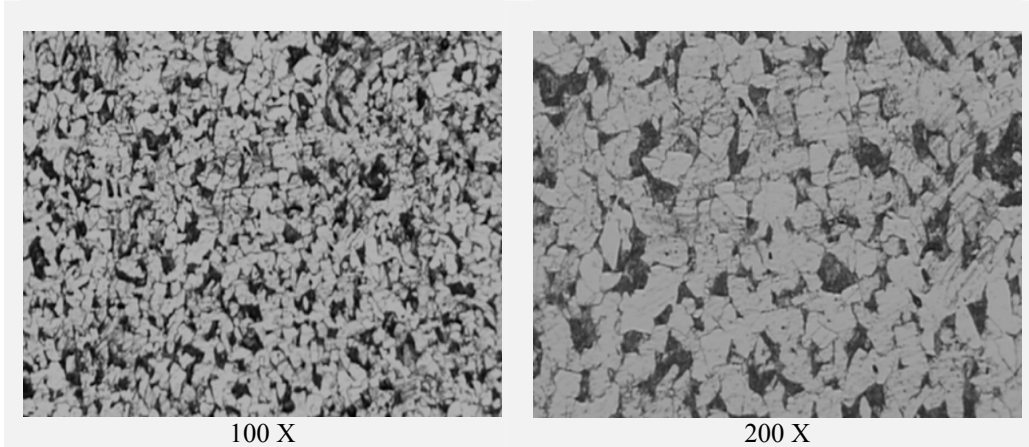
Se concluyó que la muestra está dentro de las especificaciones para este tipo de acero, se puede considerar como un acero limpio debido al porcentaje mínimo de elementos aleantes los cuales no tienen efecto significativo en la investigación.

Tabla 3. Resultados de la composición química del acero AISI SAE 1020

<i>Elementos</i>	<i>Muestra</i>	<i>AISI-SAE 1020</i>
<i>C</i>	<i>0.21 ±0.0014</i>	<i>0.18 – 0.23</i>
<i>Mn</i>	<i>0.58 ±0.0071</i>	<i>0.30 – 0.59</i>
<i>P</i>	<i>0.013 ±0.0012</i>	<i>0.040 max.</i>
<i>S</i>	<i>0.022 ±0.0041</i>	<i>0.050 max.</i>
<i>Si</i>	<i>0.19 ±0.0031</i>	<i>0.15 – 0.3</i>
<i>Cu</i>	<i>0.18 ±0.0366</i>	
<i>Ni</i>	<i>0.07 ±0.0053</i>	
<i>Cr</i>	<i>0.09 ±0.0017</i>	
<i>Mo</i>	<i>0.02 ±0.0005</i>	
<i>Sn</i>	<i>0.012±0.0023</i>	
<i>V</i>	<i>0.004±0.001</i>	
<i>Nb</i>	<i>0.020±0.002</i>	
<i>Al</i>	<i>&lt; 0.001</i>	
<i>Ti</i>	<i>&lt; 0.00</i>	
<i>Fe</i>	<i>Balance</i>	

\* **Análisis Metalográfico.** La micrografía observada fue obtenida cuando el acero fue atacado con Nital al 3%, se observa una microestructura semejante en toda la sección transversal compuesta principalmente por granos de ferrita y perlita con un tamaño de grano ferrítico N° 8. De acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM E-112. esta estructura es característica de aceros de bajo contenido de carbono. (Ver fotografía 3).

Fotografía 3. Micrografía del acero AISI SAE 1020



Fuente: Autor del proyecto

\* **Dureza.** Sobre la sección transversal de la muestra se realizó la toma de dureza por medio de un medidor de dureza en la escala Rockwell A, con 60 Kg. de carga aplicada y punta de diamante. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de la Prueba de Dureza del acero AISI 1020

<i>PUNTO</i>	<i>DUREZA ROCKWELL A</i>
<i>1</i>	<i>50</i>
<i>2</i>	<i>53</i>
<i>3</i>	<i>51</i>
<i>D prom</i>	<i>51.33±1,437</i>

Fuente: Autor del proyecto

**3.5.2 Solución inicial de trabajo.** Para la realización de las pruebas de laboratorio se elaboraron tres tipos de soluciones:

\* **Solución para las pruebas de erosión pura.** La mezcla de trabajo fue compuesta por agua desionizada y partículas de SiO<sub>2</sub>. Esta mezcla fue purgada con nitrógeno para reducir el nivel de corrosividad treinta minutos antes de la inmersión de la muestra con un caudal de flujo de 150 ml/min, según lo especifica la norma ASTM G59, tiempo en el cual la concentración de oxígeno descendió a valores menores de 0,1 ppm, medido mediante ampollas de oxígeno, para mantener el sistema libre de corrosión se mantuvo el caudal de nitrógeno durante el desarrollo de todo el ensayo.

\* **Solución para las pruebas de corrosión pura.** La mezcla de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl con una mezcla de CO<sub>2</sub> al 5% en volumen (balance nitrógeno) y agua desionizada. 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 la realización de los ensayos.

\* **Solución para las pruebas de corrosión asistida por erosión y erosión-corrosión.** La mezcla de trabajo fue agua desionizada, NaCl al 3% en peso 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>.

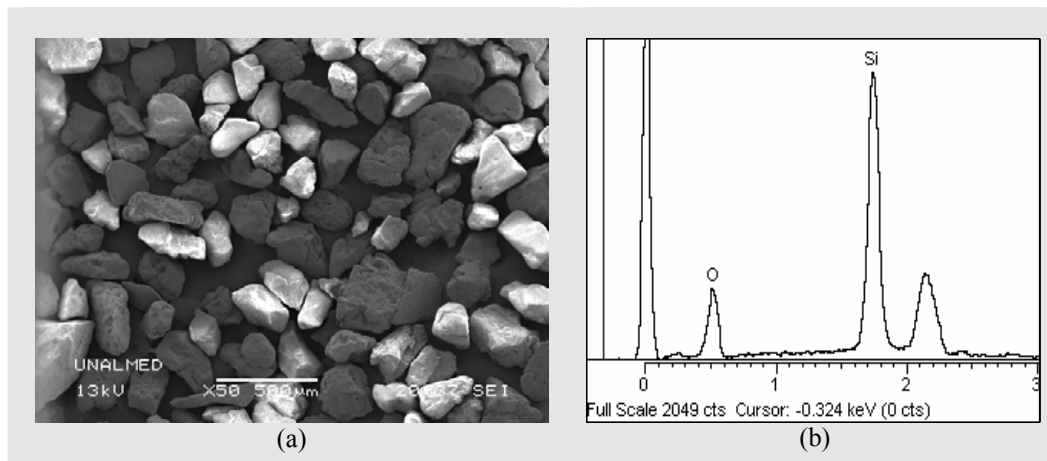
**3.5.3 Caracterización de la arena.** El tipo de arena utilizada procede del municipio de Sabana de torres de forma angular con una dureza según la escala de Mohs de 7.

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 8-a y 8-b respectivamente.

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

Nombre de la muestra	Parámetros analizados						
	$Al_2O_3$ [%]	$Fe_2O_3$ [%]	$MgO$ [%]	$K_2O$ [%]	$Na_2O$ [%]	$CaO$ [%]	$SiO_2$ [%]
Arena	0,094	0,028	0,033	0,060	0,107	0,027	99.7

Figura 8. SEM y EDS para la muestra de arena



Fuente: Autor del proyecto

### **3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL ESTADÍSTICO**

Para evaluar la influencia de cada variable independiente y la interacción entre ellas la variable dependiente (Velocidad de erosión-corrosión) se elaboró un diseño experimental de  $2^3$  para las pruebas de erosión pura y los ensayos de erosión-corrosión, 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 en esta investigación como se muestran en las tablas 6, 7 y 8.

### **3.7 REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO**

Para la realización de los ensayos de laboratorio se dividió en cuatro etapas principales: erosión pura, corrosión pura, corrosión asistida por erosión y erosión-corrosión total para la consecución de los datos se utilizó el electrodo de cilindro rotatorio y la celda descrita anteriormente donde se manejaron diferentes condiciones como la velocidad de rotación, concentración y tamaño de partículas, ver tablas del 6 al 8.

Para la determinación de las pruebas de erosión pura y erosión-corrosión se utilizó la técnica de gravimetría. Para determinar las velocidades de corrosión y corrosión asistida por erosión se utilizaron las técnicas electroquímicas de resistencia a la polarización, curvas de Tafel y espectroscopia de impedancias electroquímicas y ruido electroquímico. Se realizaron pruebas adicionales en el microscopio óptico y en el SEM-DRS para determinar los productos de corrosión generados por el flujo multifásico. Mediante microscopía óptica se observó el tipo de daño producido por las partículas sólidas del flujo sobre el acero AISI-SAE 1020.

Tabla 6. Matriz para las pruebas de erosión pura

<b>Prueba de Erosión pura</b>			
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	<b>Concentración de partículas (%W)</b>	<b>Tamaño de partículas (µm)</b>	<b>Ensayo a realizar</b>
1000	10	50	Gravimetría  Caracterización Morfológica de la superficie
		150	
	30	50	
		150	
3000	10	50	
		150	
	30	50	
		150	
2000	20	100	

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 7. Matriz para las pruebas de erosión-corrosión y corrosión asistida por erosión

<b>Prueba de erosión-corrosión y corrosión asistida por erosión</b>				
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	<b>Concentración de partículas (%W)</b>	<b>Tamaño de partículas (µm)</b>	<b>Gas corrosivo</b>	<b>Ensayo a realizar</b>
1000	10	50	CO <sub>2</sub> al 5%	R.P Impedancia Pendiente Tafel Ruido Electroquímico Caracterización Morfológica de la superficie
		150		
	30	50		
		150		
3000	10	50		
		150		
	30	50		
		150		
2000	20	100		

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 8. Matriz para las pruebas de corrosión pura.

<b>Prueba de corrosión pura</b>		
<b>Velocidad de rotación (rpm)</b>	<b>Gas Corrosivo</b>	<b>Ensayo a realizar</b>
1000	CO <sub>2</sub> al 5%	R.P Impedancia Pendiente Tafel Ruido Electroquímico
3000		
2000		

Fuente: Autor del proyecto

### **3.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

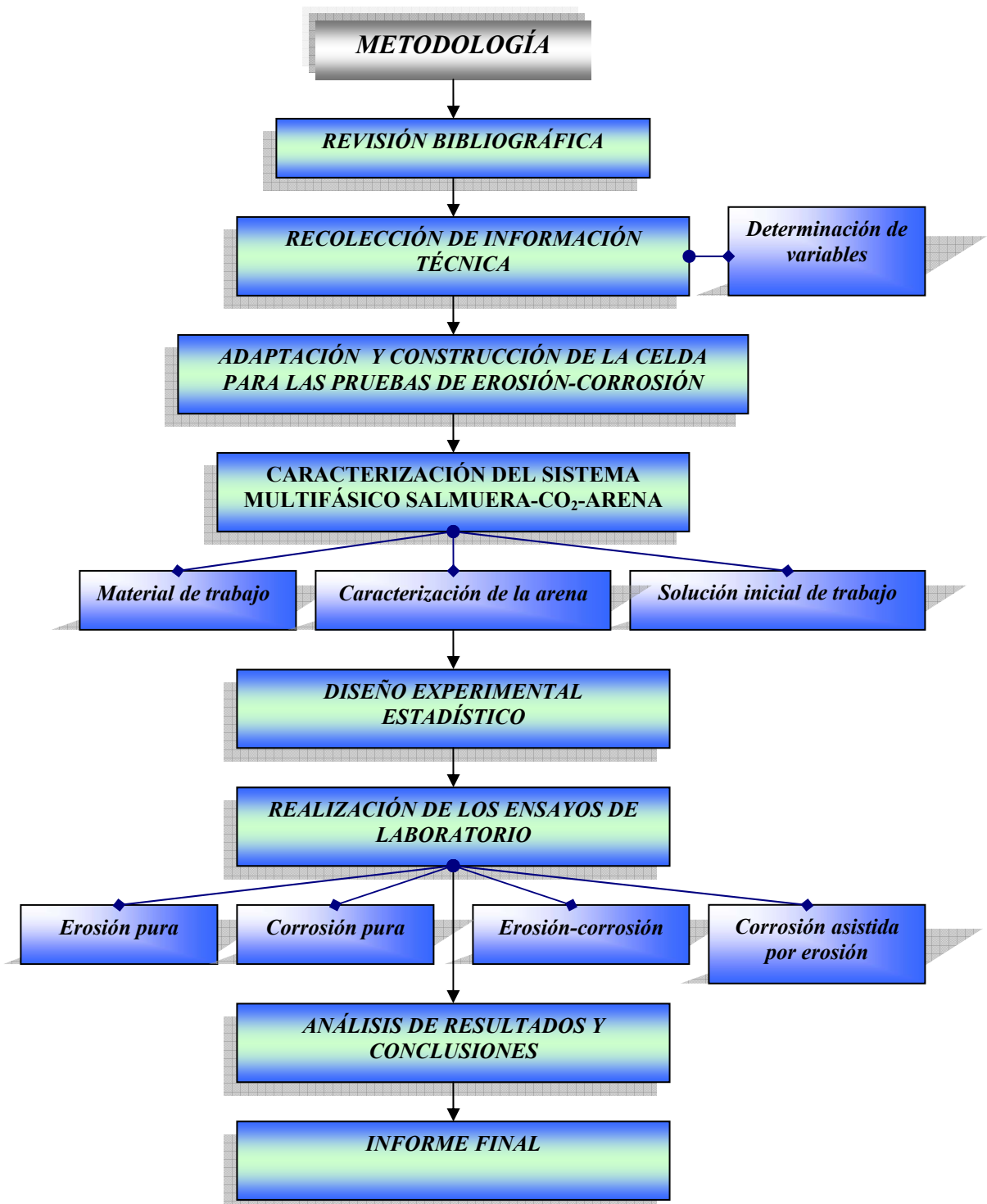
Después de obtener los resultados en cada uno de los equipos de laboratorio, bajo las diferentes variables aplicadas para el ensayo, se procedió a analizar cada uno de los efectos producidos por cada una de las etapas sobre el acero AISI-SAE 1020, se determinó su resistencia a la erosión-corrosión, y se desarrolló un mapa de erosión-corrosión del acero AISI-SAE 1020

### **3.9 INFORME FINAL**

En esta etapa del proyecto se presentó un informe por escrito el cual contiene toda la información pertinente del proyecto como el marco teórico, estado del arte, justificación, resultados experimentales, análisis de esos resultados y conclusiones a la Universidad Industrial de Santander y a la dirección de investigaciones fisicoquímicas DIEF.

En la figura 9 se presenta el esquema general utilizado en la metodología.

Figura 9. Diagrama de metodología de la investigación.



## **4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados más interesantes 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 el numeral 3.5 de la metodología cuyos resultados son aceptables para la realización de los ensayos.

En la tabla 3 y fotografía 3, se presentaron los resultados del análisis de la composición química del material y de la microestructura del electrodo de acero al carbono sobre el cual se determinaron las velocidades de corrosión. Este análisis indica que el material del electrodo corresponde a un acero al carbono AISI-SAE 1020 con una estructura metalúrgica de ferrita y perlita. Este material y su estructura son comunes en la fabricación de las tuberías que transportan los hidrocarburos en la industria del petróleo.

En la tabla 4 y figura 8 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.

### **4.1 RESULTADOS ETAPA I: VELOCIDAD DE EROSIÓN EN AUSENCIA DE CORROSIÓN (EROSIÓN PURA-Keo).**

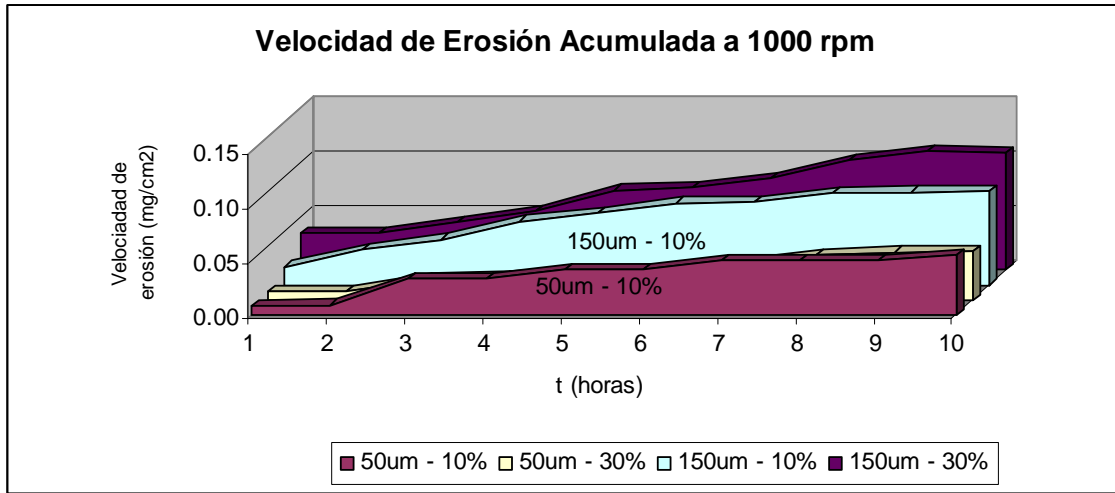
La mezcla de trabajo para esta prueba está compuesta por agua desionizada y partículas de  $\text{SiO}_2$ . Esta mezcla fue purgada con nitrógeno treinta minutos antes de la inmersión de la muestra con un caudal de flujo de 150 ml/min, según lo especifica la norma ASTM G59, este caudal se mantuvo constante durante toda la prueba. Los valores bajos de la concentración del oxígeno menores a 0,1 ppm y hierro disuelto menor a 2ppm disuelto, indican que no existe una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro o algún otro compuesto, condición que se consiguió y se confirmó al realizar el análisis visual

después de retirar las probetas de la celdas, y más adelante, al realizarse el análisis metalográfico el cual no reveló la formación de películas de corrosión en la superficie del material. Los resultados totales obtenidos en esta primera etapa, se refieren a las medidas de las velocidades de erosión en ausencia de corrosión del electrodo de acero al carbono AISI SAE 1020, por el método de gravimetría expuesto al fluido mencionado anteriormente, durante 10 horas a 1000 2000 y 3000 rpm con diferentes tamaños y concentraciones de partículas.

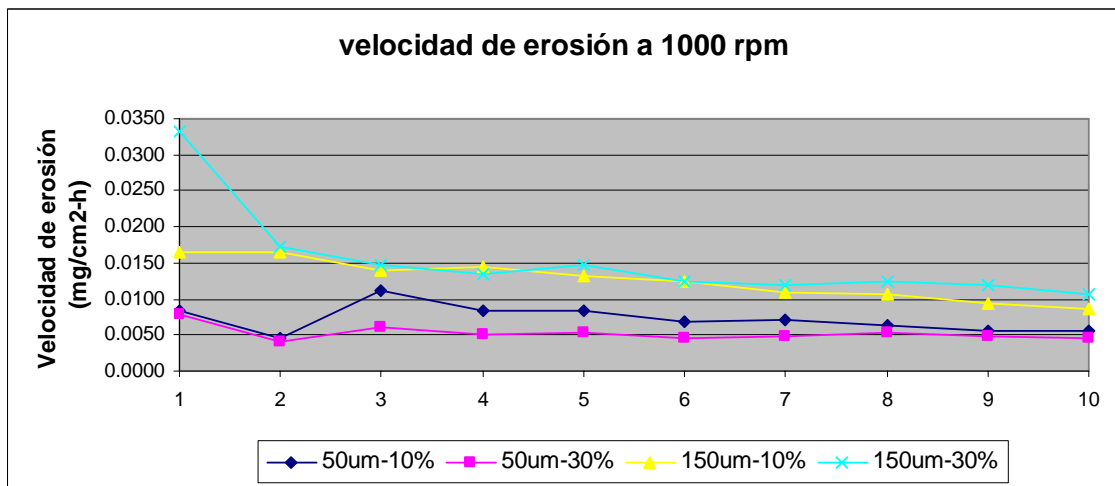
**4.1.1 Velocidad de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm.** En la figura 10 se muestran los resultados de velocidad de erosión con un tamaño de partícula de 50 y 150  $\mu\text{m}$ , variando la concentración de partículas entre 10 y 30% en peso. Se observa en la gráfica que para el mismo tamaño de partícula se obtienen valores de velocidad de erosión muy cercanos, aunque se cambie la concentración de partículas, lo que significa que la concentración de partícula no tiene un efecto tan marcado como la velocidad de erosión para esta velocidad, pero si el tamaño de partícula, este incremento de deterioro se puede atribuir a un incremento en la energía cinética de las partículas que golpean la superficie debido al aumento de tamaño.

En la gráfica se observa que después de cierto tiempo (6h) la velocidad de deterioro tiende a ser constante y esto se debe a que a medida que las partículas impactan la superficie del acero, los bordes inicialmente angulares, tienden a volverse redondeados, disminuyendo así su capacidad de corte como lo explica Clark en su publicación <sup>[34]</sup>

Figura 10. Velocidad de erosión a 1000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentración



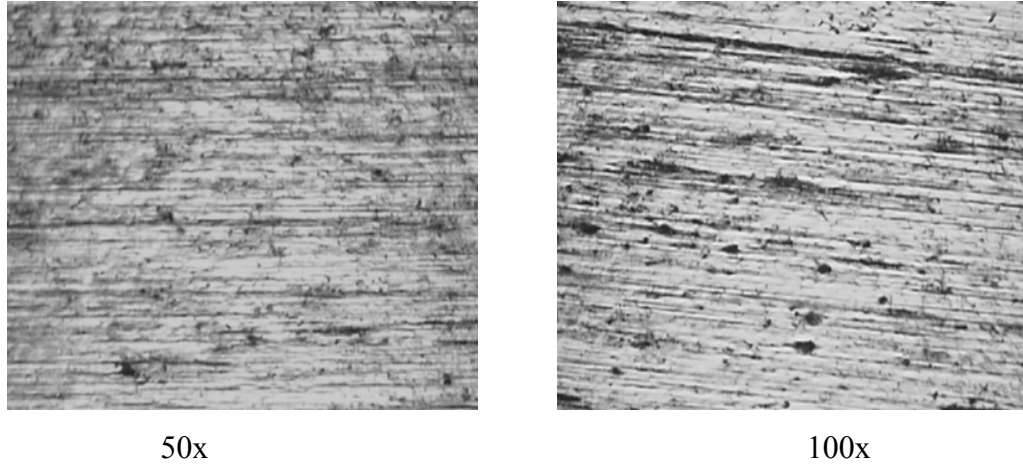
(a)



(b)

La fotografía 4 muestra la superficie del material después de la prueba (50µm-10%-1000rpm) donde se evidencia la ausencia de una capa corrosiva. La muestra presenta un mínimo deterioro sobre la superficie del material donde apenas se empiezan a formar las colinas y los valles característico del proceso erosivo para materiales dúctiles.

Fotografía 4. Superficie del acero después del ensayo (10%W, 50 $\mu$ m, 1000 rpm)

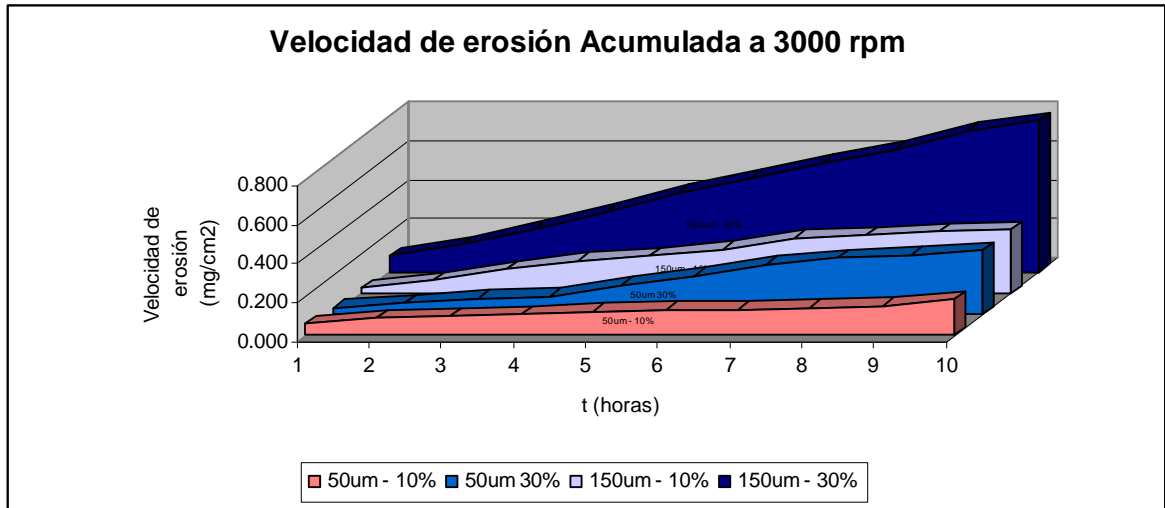


**4.1.2 Velocidad de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm.** Al aumentar la velocidad de rotación se observa un incremento en las velocidades de deterioro como se puede observar en las escalas del eje Y de la figura 11 comparada con la figura 10, lo que quiere decir que la velocidad de erosión es proporcional a la velocidad del fluido multifásico.

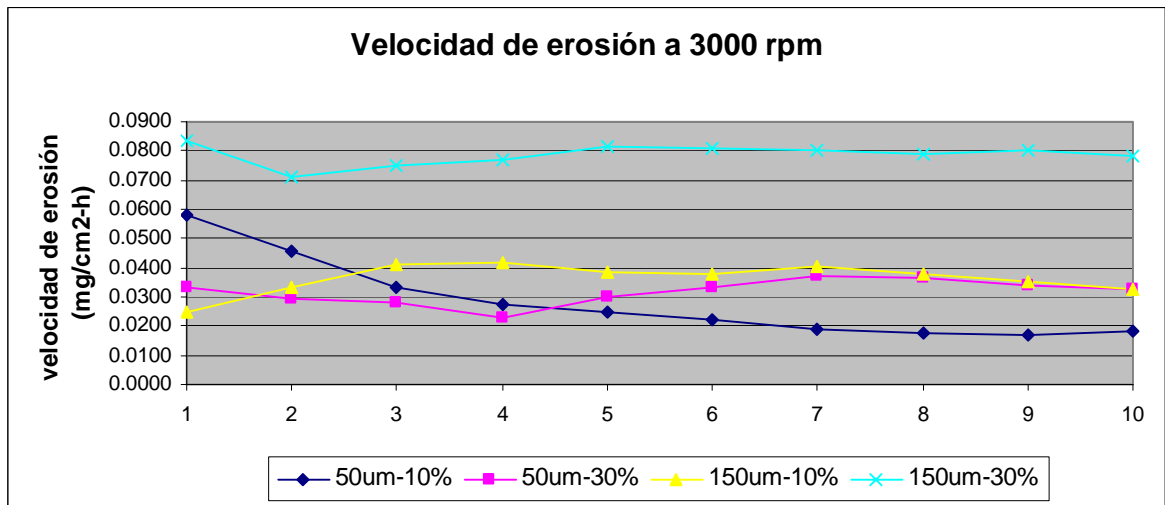
En la figura 11 se puede observar que, para porcentajes bajos de partículas la velocidad de erosión después de cierto tiempo,<sup>[34]</sup> se mantiene casi constante y es muy similar al deterioro presentado a altos porcentajes de partículas hasta un tiempo límite (4h), pero para tiempo mayores a éste y altos porcentajes de partículas, hay una mayor velocidad de desgaste, esto puede ser atribuido al hecho de que una mayor cantidad de partículas facilita la remoción de material a pesar de la pérdida de la angularidad en los bordes de las partículas; este fenómeno es más acentuado a altas velocidades.<sup>[27]</sup>

A 3000 rpm y 150 $\mu$ m se obtuvo la mayor velocidad de erosión del sistema debido al efecto combinado del tamaño y concentración de partículas.

Figura 11. Velocidad de erosión a 3000 rpm con diferentes tamaños de partículas y concentración.



(a)

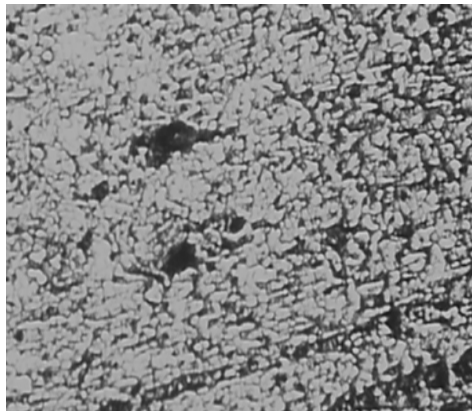


(b)

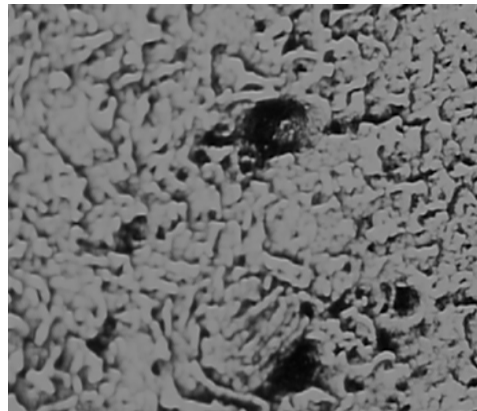
A estas condiciones el deterioro del material es mayor, ya que se observan los valles y colinas que demuestran que el material fue sometido a un proceso de desgaste mecánico por partículas abrasivas, esta morfología es típica de materiales dúctiles y concuerda con el mecanismo de daño observado por otro investigador <sup>[26]</sup>, como se muestra en la fotografía 5 a diez horas de ensayo.

La velocidad de erosión puede ser expresada en gramos por milímetro cuadrado por minuto ( $\text{gr}/\text{mm}^2\text{-min}$ ), así como en miligramos por centímetro cuadrado por hora ( $\text{mg}/\text{cm}^2\text{-h}$ ), definiendo la pérdida de masa del material por las partículas que golpean la superficie en una unidad de tiempo.

Fotografía 5. Superficie del acero después del ensayo (30%W, 150 $\mu\text{m}$ , 3000 rpm)



50x



100x

La tabla 9 muestra los valores de las velocidades de erosión a 10 horas de exposición, donde se puede decir que a velocidades bajas, la concentración de partículas no tiene un efecto marcado, contrario a lo que ocurre a velocidades más altas. La velocidad de rotación y el tamaño de partícula tienen un efecto en el sistema, sin embargo se realizó un análisis estadístico a las variables utilizadas para determinar el grado de influencia de las variables principales y su combinación en el sistema erosivo, tomando como variable dependiente la velocidad de erosión, y como variables independientes, la concentración, tamaño y velocidad de partículas, para los ensayos realizados y se encontró lo siguiente.

Tabla 9. Resultados de los ensayos de erosión pura (I etapa)

<i>Condiciones</i>	<i>V erosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>	<i>Condiciones</i>	<i>V erosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>
1000 rpm 50 μm 10 % W	0.0058	3000 rpm 50 μm 10 % W	0.0222
1000 rpm 50 μm 30 % W	0.0052	3000 rpm 50 μm 30 % W	0.0324
1000 rpm 150 μm 10 % W	0.0093	3000 rpm 150 μm 10 % W	0.0368
1000 rpm 150 μm 30 % W	0.0116	3000 rpm 150 μm 30 % W	0.0780
2000 rpm 100 μm 20 % W	0.0346	2000 rpm 100 μm 20 % W	0.0325

Análisis de varianza para la velocidad de erosión:

---

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	Var. Comp.	Percent
total (corrected)	0,00495691	8			
conc part	0,000472534	2	0,000236267	0,0	0,00
tam part	0,000987625	2	0,000493812	0,0	0,00
vel rot	0,00349675	4	0,000874187	0,000874187	100,00

---

La tabla del análisis de varianza mostrada divide la varianza de la velocidad de erosión dentro de tres componentes. El objetivo de tal análisis fue estimar la cantidad de variabilidad contribuida por cada uno de los factores, llamados los componentes de varianza. En este caso, el factor que contribuye la mayor varianza es la velocidad de rotación (rpm).

Por otro lado, el análisis de la regresión múltiple mostró los siguientes resultados:

-----  
 Dependent variable: VE mg cm2 h  
 -----

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-0,0384889	0,0221197	-1,74003	0,1423
Rpm	0,0000164	0,00000616129	2,66178	0,0448
Tam	0,0002125	0,000123226	1,72448	0,1452
[ ]	0,0006925	0,000616129	1,12395	0,3121

-----  
 Analysis of Variance  
 -----

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	0,00343845	3	0,00114615	3,77	0,0934
Residual	0,00151846	5	0,000303692		
Total (Corr.)	0,00495691	8			

R-squared = 69,3668 percent  
 R-squared (adjusted for d.f.) = 50,9869 percent  
 Standard Error of Est. = 0,0174268  
 Mean absolute error = 0,011279  
 Durbin-Watson statistic = 2,14256

Los datos mostrados en las anteriores tablas son el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre la velocidad de erosión del acero AISI SAE 1020 y tres variables independientes. La ecuación del modelo es:

$$\text{VE mg cm2 h} = 0,0256375 + 0,0092375 \cdot \text{tam} + 0,0071125 \cdot [ ] + 0,0176625 \cdot \text{rpm}$$

#### **4.2 RESULTADOS ETAPA II: VELOCIDAD DE CORROSIÓN EN AUSENCIA DE EROSIÓN (CORROSIÓN PURA-K<sub>co</sub>).**

La mezcla de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl con CO<sub>2</sub> al 5% en volumen y agua desionizada. La solución fue purgada con nitrógeno y burbujeada después con CO<sub>2</sub> al 5% en volumen durante la realización de los ensayos. Los valores bajos de la concentración del oxígeno así como del hierro disuelto indicaron que no existe una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro diferentes a los formados por la acción de la mezcla de trabajo, esto se comprueba por medio de las curvas Tafel y los diagramas de Nyquist.

Los resultados obtenidos en esta etapa se refieren a las medidas de las velocidades de corrosión en ausencia de erosión del electrodo de acero al carbono 1020 por el método de las técnicas de resistencia a la polarización, extrapolación de Tafel y Espectroscopia de impedancia electroquímica a diferentes velocidades de rotación bajo la norma ASTM G-102.

Las figuras 12 y 13 muestran los resultados de las técnicas de corriente directa. En la figura 12 se puede observar la disminución de la 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, estos resultados son concordantes con las curvas Tafel mostradas en la figura 13, donde se puede observar un desplazamiento hacia la derecha a medida que aumenta la velocidad del sistema indicando un aumento en la corriente de corrosión. Un análisis de las curva muestra que la etapa controlante en este sistema es la difusión debido a que la corriente catódica se acerca a la corriente límite de difusión, además se observa que la pendiente catódica se desplaza a la derecha a medida que aumenta la velocidad de rotación, esto se debe a que se tienen mucho más especies en el seno de la solución.

Figura 12. Curvas de Rp a diferentes velocidades de rotación.

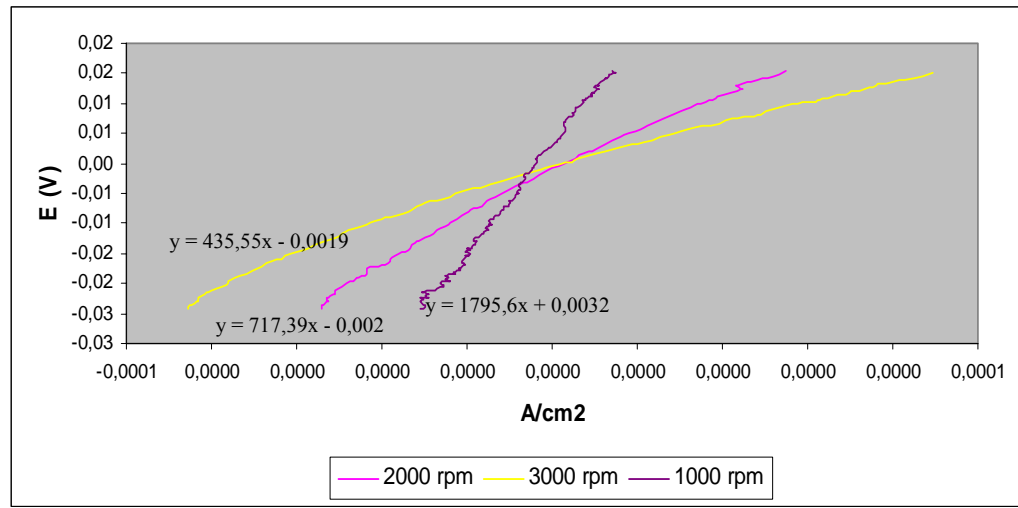
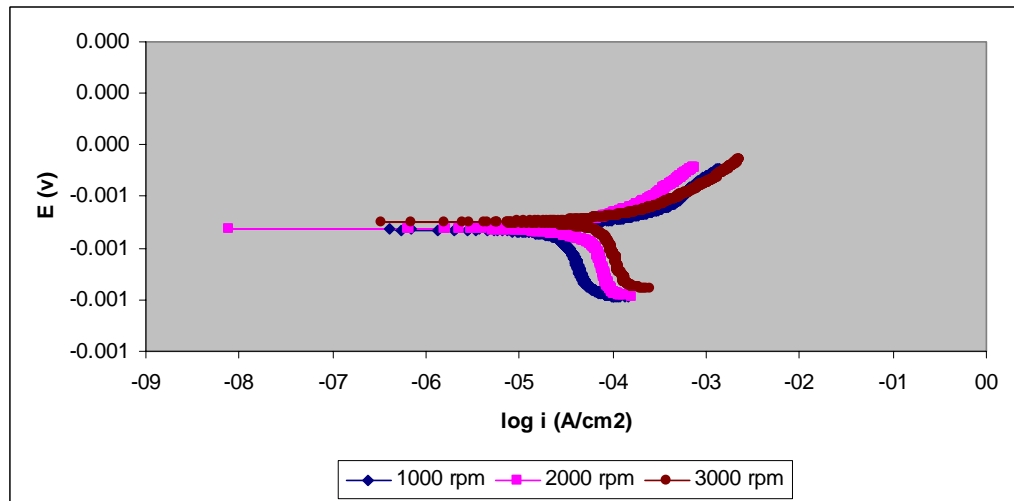


Figura 13. Curvas Tafel a diferentes velocidades de rotación.



Los resultados de la técnica de corriente alterna se muestran en la figura 14, donde se observa un aumento en la resistencia a la polarización a medida que disminuye la velocidad de rotación, el comportamiento de la resistencia a la polarización es muy similar a los calculados por la técnica de corriente directa. La tabla 10 recopila los valores de resistencia a la polarización por ambas técnicas, el valor de corriente de corrosión y la velocidad de corrosión en  $\text{mg}/\text{cm}^2\text{-h}$ , los cálculos de estos valores son realizados según las ecuaciones planteadas en la norma ASTM G102.

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>46</sup> Este comportamiento se presenta en todas las pruebas de corrosión por CO<sub>2</sub> realizadas en el presente trabajo.

Figura 14. Diagramas de Nyquist a diferentes velocidades de rotación

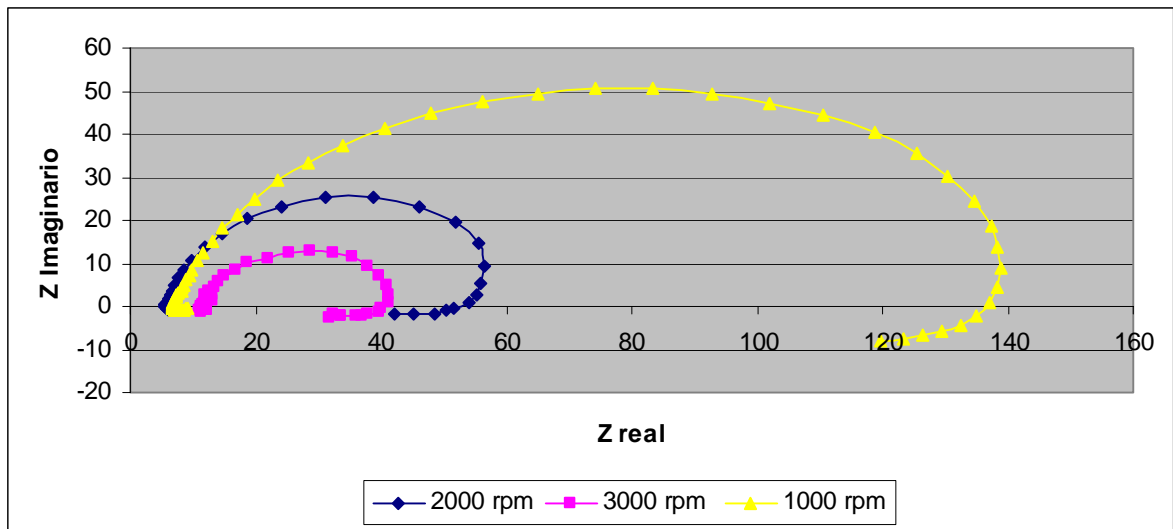


Tabla 10. Resultados de la velocidad de corrosión del acero AISI 1020 por las técnicas de corriente directa y alterna

Velocidad de rotación (rpm)	Rp CD ( $\Omega\text{cm}^2$ )	Rp CA ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de corrosión $\text{mg}/\text{cm}^2\text{-h}$
1000	1795	1347	14,99	0,0044
2000	718	538	30,08	0,0088
3000	435	328	45,43	0,0133

### **4.3 RESULTADOS ETAPA III: VELOCIDAD DE CORROSIÓN TOTAL EN PRESENCIA DE EROSIÓN - Kc.**

En la tercera etapa la solución de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl con CO<sub>2</sub> al 5% y a diferentes tamaños y concentraciones de partículas. La solución fue purgada con nitrógeno y burbujeadada después con CO<sub>2</sub> al 5% en volumen durante la realización de los ensayos. Los valores bajos de la concentración del oxígeno así como del hierro disuelto indican que no existe una tendencia a la formación de películas de óxidos de hierro diferentes a los formados por la acción de la mezcla de trabajo, esto se comprueba por medio de las curvas Tafel y los diagramas de Nyquist.

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 1020 por el método de las técnicas de resistencia a la polarización, extrapolación de Tafel y Espectroscopia de impedancia electroquímica a diferentes velocidades de rotación.

**4.3.1 Velocidad de corrosión en presencia de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm.** La figura 15 muestra la resistencia a la polarización cuando las condiciones de ensayo se llevaron a cabo a una velocidad de 1000 rpm, 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 µm, lo que significa que este grupo tiene una menor velocidad de corrosión lo que está de acuerdo con los diagramas de Nyquist para estas mismas condiciones, ver figura 16. 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 CO<sub>2</sub> en el sistema.

Nuevamente se puede observar que a velocidades bajas (1000 rpm) la concentración de partículas no tiene un efecto tan marcado en el fenómeno de corrosión, así como sucede en el fenómeno erosivo a 1000 rpm; y el efecto del tamaño de partículas en la velocidad de

corrosión, presenta el mismo comportamiento estudiado en la etapa 1 de la experimentación.

En la figura 17 se muestra las graficas Tafel donde se puede observar una corriente límite que indica que la etapa controlante de la corrosión es la transferencia de masa, debido a que la corriente catódica se acerca a la corriente límite de difusión; para 150 micras se observa la mayor densidad de corriente. En cuanto a las pendientes anódicas no se observó una variación significativa en sus pendientes al cambiar la concentración de partículas.

Figura 15. Resistencia a la polarización a 1000 rpm

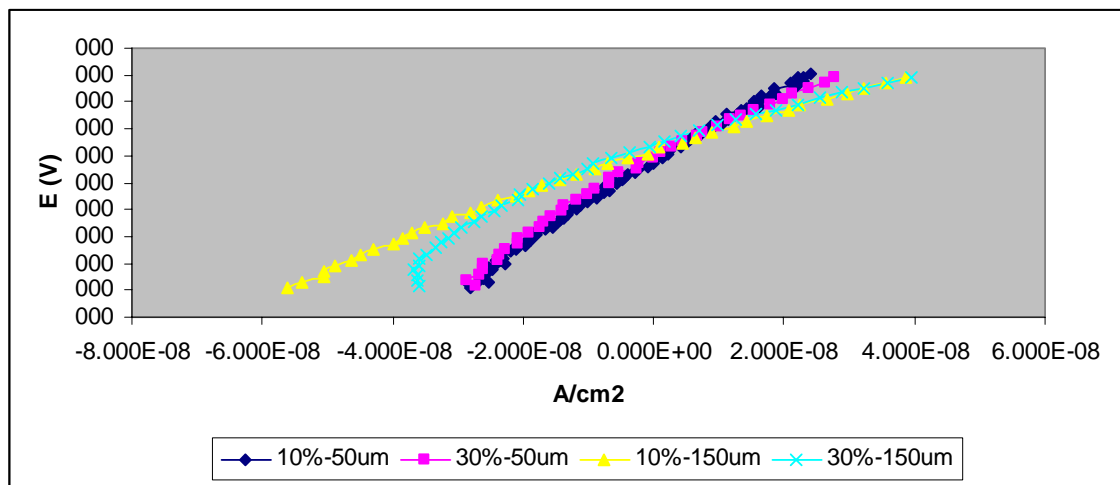
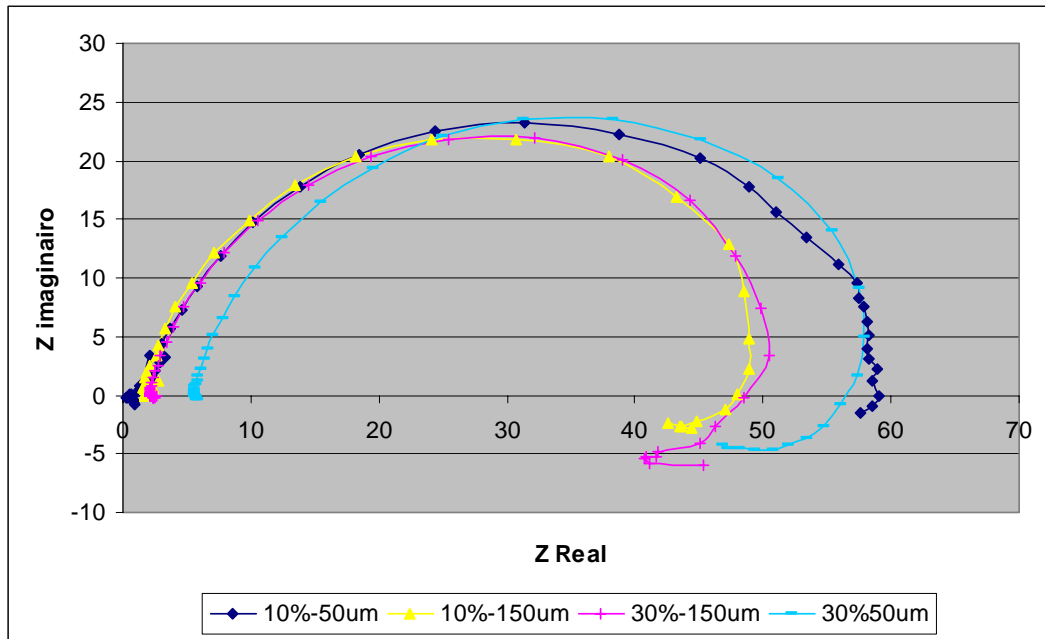


Figura 16. Diagramas de Nyquist a 1000 rpm



Para el cálculo de densidad de corriente primero se calculan las pendientes anódicas de cada curva y luego se calcula el valor de la constante de Stern Geary ( $B = \beta_a / 2.3$ ). Con estos valores y los de  $R_p$  calculados por corriente directa, se define el valor de la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) los cuales se muestran en la tabla 11, junto con el valor velocidad de corrosión, la cual aumenta al aumentar el tamaño de partícula. A bajas velocidades de rotación el efecto de la concentración de partícula es mínimo, comportamiento similar registrado en las pruebas de erosión pura.

Figura 17. Curvas Tafel a 1000 rpm.

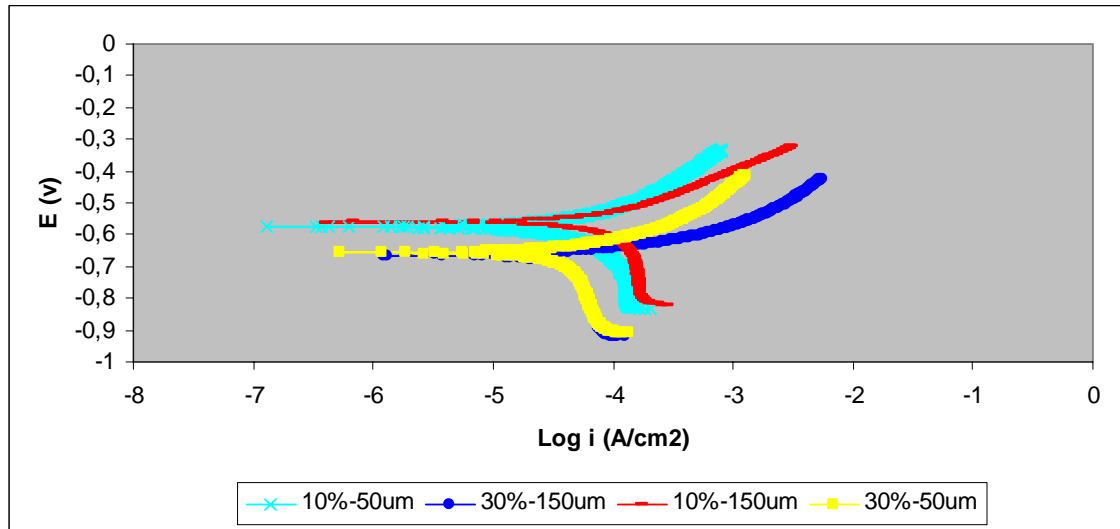


Tabla 11. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena a 1000 rpm

<i>Condiciones</i>	<i>R<sub>p</sub> CD (Ωcm<sup>2</sup>)</i>	<i>R<sub>p</sub> CA (Ωcm<sup>2</sup>)</i>	<i>i<sub>corr</sub> (A/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>V Corrosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>
1000 rpm 50 μm 10 % W	703	661	39,00	0,0114
1000 rpm 50 μm 30 % W	645	576	45,54	0,0134
1000 rpm 150 μm 10 % W	376	364	65,24	0,0191
1000 rpm 150 μm 30 % W	393	396	62,58	0,0184

**4.3.2 Velocidad de corrosión en presencia de erosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm.** Las curvas de resistencia a la polarización se muestran en la figura 18 en las cuales se observa pendientes muy similares, sin embargo los valores de R<sub>p</sub> disminuyen con el aumento del porcentaje de arena, la R<sub>p</sub> más baja se encuentra cuando se le adiciona al sistema 30% de partículas, lo que significa la máxima

velocidad de deterioro a esta condición. Los resultados de la técnica de resistencia a la polarización se muestran en la tabla 12.

Figura 18. Resistencia a la polarización a 3000 rpm

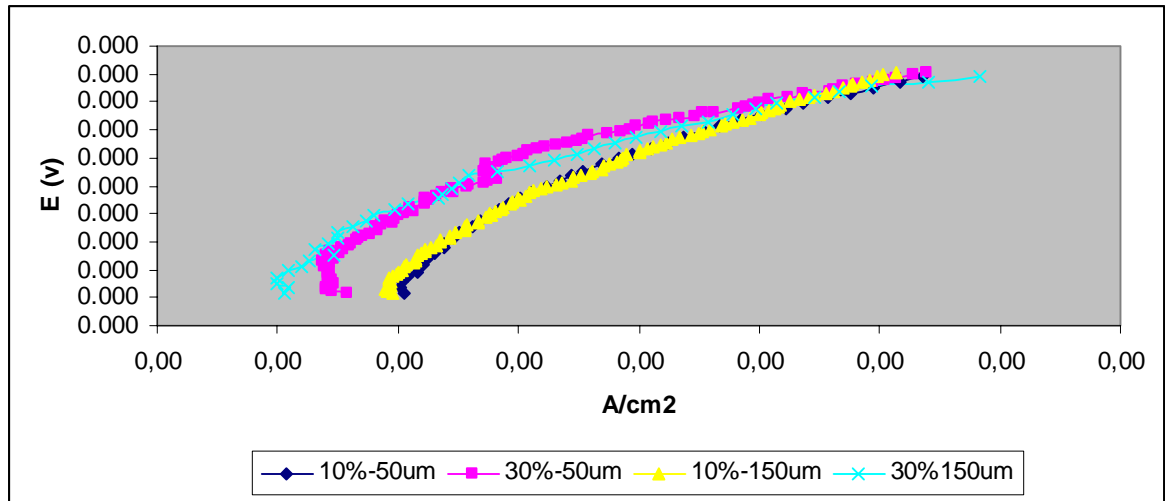


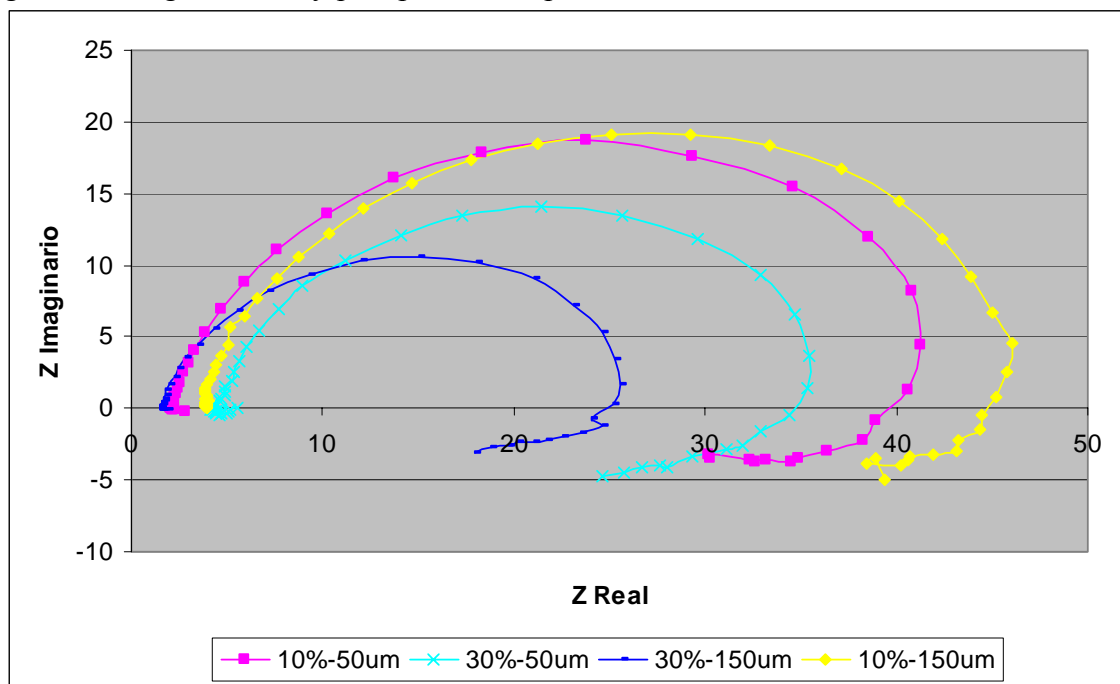
Tabla 12. Velocidad de corrosión del sistema CO<sub>2</sub>-Salmuera-Arena a 3000 rpm

<i>Condiciones</i>	<i>R<sub>p</sub> CD (Ωcm<sup>2</sup>)</i>	<i>R<sub>p</sub> CA (Ωcm<sup>2</sup>)</i>	<i>i<sub>corr</sub> (A/cm<sup>2</sup>)</i>	<i>V Corrosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>
3000 rpm 50 μm 10 % W	430	367	60,69	0,0178
3000 rpm 50 μm 30 % W	376	267	79,22	0,0233
3000 rpm 150 μm 10 % W	433	399	63,52	0,0186
3000 rpm 150 μm 30 % W	331	228	83,96	0,0246

Al analizar los diagramas de Nyquist de la figura 19, para una velocidad de rotación de 3000 rpm, 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, ó posiblemente, por la topografía y defectos de la superficie del acero expuesto a las partículas.

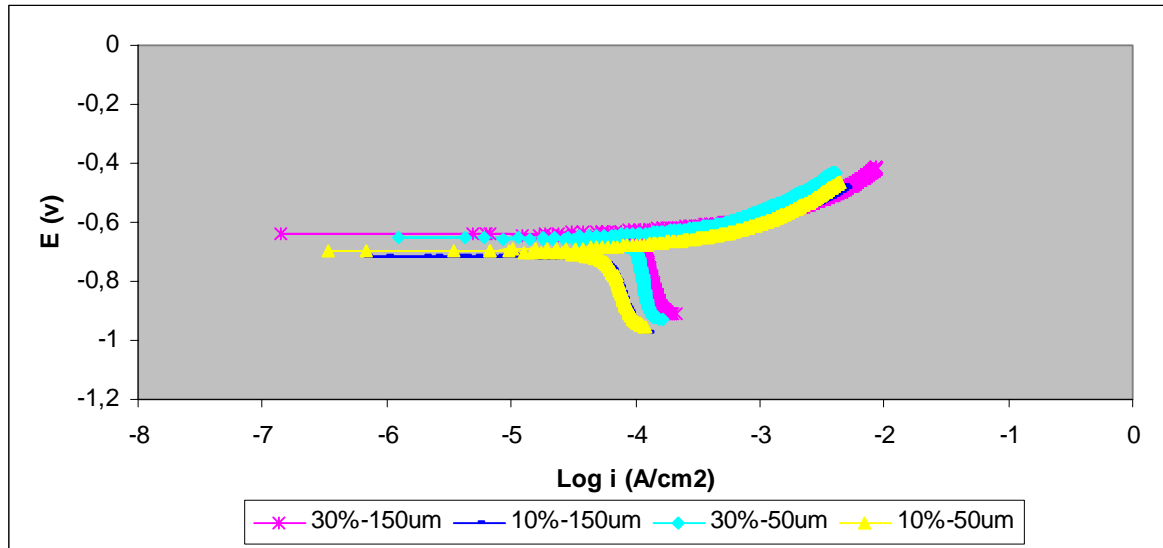
Estos diagramas no muestran semicírculos perfectos, se observa una forma ovalada sobre el eje real principalmente a bajas frecuencias esto es debido posiblemente a las altas perturbaciones en la superficie ocasionadas por la arena.<sup>40</sup>

Figura 19. Diagrama de Nyquist para 3000 rpm



Al realizar las curvas Tafel a una velocidad de rotación de 3000 rpm y diferentes concentraciones y tamaño de partícula se obtiene los siguientes resultados, ver figura 20.

Figura 20. Curvas de Tafel a una velocidad de rotación de 3000 rpm



La evidencia de una corriente límite en el sistema indica que el proceso está controlado por difusión o transferencia de masa, también se observa un desplazamiento hacia la derecha de las curvas Tafel que tienen un porcentaje mayor de partículas, donde la mayor densidad de corriente fue para el ensayo con 150 micras con una concentración de 30%, 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.

#### 4.4 RESULTADOS ETAPA IV: VELOCIDAD DE EROSIÓN-CORROSIÓN TOTAL – Ke-c.

En esta última etapa la solución de trabajo fue salmuera al 3% en peso de NaCl con CO<sub>2</sub> al 5% y diferentes tamaños/concentraciones de partículas. La solución fue purgada con nitrógeno y burbujeadada después con CO<sub>2</sub> al 5% en volumen la cual se mantuvo durante toda la realización de los ensayos. Los resultados obtenidos en esta etapa se refieren a las medidas de las velocidades de erosión-corrosión total del electrodo de acero al carbono 1020, por el método de gravimetría realizada según la norma ASTM G1, a diferentes

velocidades de rotación con un tiempo promedio para cada una de los ensayos de seis horas.

**4.4.1 Velocidad de erosión-corrosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 1000 rpm.** En la tabla 13 se muestran los resultados de velocidad de erosión-corrosión con un tamaño de partícula de 50 y 150  $\mu\text{m}$ , variando el porcentaje de partículas entre 10 y 30% en peso a una velocidad de rotación de 1000 rpm durante cuatro horas. Luego del ensayo se realizó la limpieza del espécimen según la norma ASTM G1 y luego se calculó su diferencia de peso. Los resultados muestran nuevamente que a velocidades bajas la concentración de partículas no tiene un efecto significativo en el sistema. Adicionalmente se realizaron unos ensayos con sus valores medios para obtener información intermedia para el análisis de resultados en un programa estadístico.

**4.4.2 Velocidad de erosión-corrosión a diferentes tamaños y concentraciones de partícula y 3000 rpm.** En la tabla 14 se resumen los resultados obtenidos por gravimetría variando los porcentajes de partículas de 10 al 30% y los tamaños de 50 a 150  $\mu\text{m}$ . Los valores medios ayudan a determinar la tendencia del sistema y a conocer el error experimental a una velocidad de rotación de 3000 rpm

Tabla 13. Resultados de los ensayos de erosión-corrosión total a 1000 rpm.

<i>Condiciones</i>	<i>V erosión-corrosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>
1000 rpm 50 μm, 10 % W	0.01892
1000 rpm 50 μm, 30 % W	0.02027
1000 rpm 150 μm, 10 % W	0.03121
1000 rpm 150 μm, 30 % W	0.03261
2000 rpm 100 μm, 20 % W	0.05881

Tabla 14. Resultados de los ensayos de erosión-corrosión a 3000 rpm

<i>Condiciones</i>	<i>V erosión-corrosión mg/cm<sup>2</sup>-h</i>
3000 rpm 50 μm, 10 % W	0.04408
3000 rpm 50 μm, 30 % W	0.06015
3000 rpm 150 μm, 10 % W	0.06038
3000 rpm 150 μm, 30 % W	0.1118
2000 rpm 100 μm, 20 % W	0.05886

El análisis estadístico muestra los siguientes resultados:

Análisis de los Componentes de la Varianza

Variable dependiente: Ve-c

Factores:

tamaño

rpm

[ ]

Número de casos completos: 10

Análisis de la Varianza para Ve-c

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Comp. Var.	Porcentaje
TOTAL (CORREGIDO)	0,00672564	9			
tamaño	0,00127959	2	0,000639796	0,0	0,00
rpm	0,00399302	2	0,00199651	0,000816628	69,21
[ ]	0,00145302	4	0,000363255	0,000363254	30,79
ERROR	1,25E-9	1	1,25E-9	1,25E-9	0,00

La tabla del análisis de la varianza mostrada aquí divide la varianza de Ve-c en tres componentes, uno por cada factor. El objetivo del análisis es estimar la cantidad con la que contribuyen a la varianza los diferentes factores, a lo que se llama componentes de la varianza. En este caso, el factor que contribuye con la máxima varianza es rpm. Su contribución representa 69,2126% del total de la variación en Ve-c.

Por otro lado el Análisis de Regresión Múltiple muestra:

Variable dependiente: Ve-c

Parámetro	Error Estimación	Estadístico estándar	T	P-Valor
CONSTANTE	0,049709	0,00461718	10,7661	0,0000
tamaño	0,0115725	0,00516217	2,24179	0,0662
rpm	0,021675	0,00516217	4,19882	0,0057
[ ]	0,00878	0,00516217	1,70084	0,1399

-----

Análisis de Varianza

-----

Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Cociente-F	P-Valor
Modelo	0,00544653	3	0,00181551	8,52	0,0139
Residuo	0,0012791	6	0,000213184		
-----					
Total (Corr.)	0,00672564	9			

R-cuadrado = 80,9817 porcentaje

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 71,4725 porcentaje

Error estándar de est. = 0,0146008

Error absoluto medio = 0,0099875

Estadístico de Durbin-Watson = 1,66848 (P=0,2821)

Autocorrelación residual en Lag 1 = 0,0836536

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{Var}_1 = 0,049709 + 0,0115725 \cdot \text{tamaño} + 0,021675 \cdot \text{rpm} + 0,00878 \cdot [ ]$$

#### 4.5 CÁLCULO DEL EFECTOS SINERGÍSTICO DEL SISTEMA SALMUERA-CO<sub>2</sub>- ARENA A LAS DIFERENTES VELOCIDADES DE ROTACIÓN.

Para realizar el cálculo del efecto sinérgico se utiliza la ecuación 6 y para conocer el efecto de cada uno de los factores se usan las ecuaciones 3 y 4. En las etapas realizadas anteriormente se obtiene información de los valores de Keo, Kco, Kc y Ke-c y la velocidad de erosión en presencia de corrosión, se puede deducir reemplazando en la ecuación 2. Los cálculos de cada uno de los componentes de la velocidad de erosión-corrosión se muestran en la tabla 15, de cuyos datos se pueden extraer las relaciones las cuales indican cual es el fenómeno predominante en el sistema, según las ecuaciones 7 al 10.

Se puede observar que el fenómeno de erosión-corrosión no es una simple suma algebraica de cada uno de los fenómenos individuales y la sinergia del fenómeno tiene una gran contribución al deterioro del material. (Ke-c = Keo + Kco + ΔKe-c)

Se analizó cada una de las relaciones para determinar cual es el fenómeno que tiene una contribución mayor; los resultados se puede ver en la tabla 16.

Tabla 15. Componentes de la velocidad de erosión-corrosión total.

<b>Condiciones</b>	<b><i>K<sub>eo</sub></i></b>	<b><i>K<sub>co</sub></i></b>	<b><i>K<sub>c</sub></i></b>	<b><i>K<sub>e-c</sub></i></b>	<b><i>K<sub>e</sub></i></b>	<b><math>\Delta K<sub>c</sub></math></b>	<b><math>\Delta K<sub>e</sub></math></b>	<b><math>\Delta K<sub>e-c</sub></math></b>
<b>1000 rpm 50 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.0058	0,0044	0,0114	0.01892	0,00752	0,007	0,00172	0,00872
<b>1000 rpm 50 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.0052	0,0044	0,0134	0.02027	0,00687	0,009	0,00167	0,01067
<b>1000 rpm 150 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.0093	0,0044	0,0191	0.03121	0,01211	0,015	0,00281	0,01751
<b>1000 rpm 150 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.0116	0,0044	0,0184	0.03261	0,01421	0,014	0,00261	0,01661
<b>2000 rpm 100 <math>\mu</math>m 20 % W</b>	0.0346	0,0088	0,0209	0.05881	0,03791	0,012	0,00331	0,01541
<b>2000 rpm 100 <math>\mu</math>m 20 % W</b>	0.0325	0,0088	0,0215	0.05886	0,03736	0,013	0,00486	0,01756
<b>3000 rpm 50 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.0222	0,0133	0,0178	0.04408	0,02628	0,005	0,00408	0,00858
<b>3000 rpm 50 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.0324	0,0133	0,0233	0.06015	0,03685	0,010	0,00445	0,01445
<b>3000 rpm 150 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.0368	0,0133	0,0186	0.06038	0,04178	0,005	0,00498	0,01028
<b>3000 rpm 150 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.0780	0,0133	0,0246	0.11180	0,08720	0,011	0,00920	0,02050

Fuente: Autor del proyecto

Tabla 16. Relación de las diferentes velocidades de deterioro.

<i>Condiciones</i>	<i>Kc/Ke</i>	<i>Kco/Keo</i>	<i>Ke/Ke-c</i>	<i>Kc/Kc-e</i>	$\Delta Ke/Ke$	$\Delta Kc/Kc$	$\Delta Ke-c/Ke-c$
<b>1000 rpm 50 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	1.52	1.32	0.40	0.60	0.23	0.61	0.46
<b>1000 rpm 50 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	1.95	1.18	0.34	0.66	0.24	0.67	0.53
<b>1000 rpm 150 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	1.58	2.11	0.39	0.61	0.23	0.79	0.56
<b>1000 rpm 150 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	1.29	2.64	0.44	0.56	0.18	0.76	0.51
<b>2000 rpm 100 <math>\mu</math>m 20 % W</b>	0.55	3.93	0.64	0.36	0.09	0.57	0.26
<b>2000 rpm 100 <math>\mu</math>m 20 % W</b>	0.58	3.69	0.63	0.37	0.13	0.60	0.30
<b>3000 rpm 50 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.68	1.67	0.60	0.40	0.16	0.28	0.19
<b>3000 rpm 50 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.63	2.44	0.61	0.39	0.12	0.43	0.24
<b>3000 rpm 150 <math>\mu</math>m 10 % W</b>	0.45	2.77	0.69	0.31	0.12	0.27	0.17
<b>3000 rpm 150 <math>\mu</math>m 30 % W</b>	0.28	5.86	0.78	0.22	0.11	0.45	0.18

Fuente: Autor del proyecto

De acuerdo con la tabla anterior, comparando los dos fenómenos, de manera independiente, se encuentra que la erosión pura “pura” es más agresiva que la corrosión “pura”, a las mismas velocidades; inclusive hasta en un 400%.

Al analizar la erosión y corrosión total se encuentra que ambas tienen la misma influencia en el mecanismo de daño, un mecanismo relacionado con las altas velocidades del sistema el cual es gobernado por la erosión-corrosión, y uno a bajas velocidades, regido por corrosión erosión.

En la velocidad de erosión total ( $\mathbf{Ke}$ ) el efecto de la corrosión ( $\Delta\mathbf{Ke}$ ) es menor al 15% en la mayoría de los casos, y el mayor aporte lo realiza el  $\mathbf{Ke}$ . Para la velocidad de corrosión total ( $\mathbf{Kc}$ ), el efecto de la erosión en la velocidad de corrosión ( $\Delta\mathbf{Kc}$ ), es superior al 50%.

La contribución del efecto sinérgico total ( $\Delta\mathbf{Ke-c}$ ) sobre el deterioro total ( $\mathbf{Ke-c}$ ) es del 50% en promedio para velocidades bajas, y del 20% en promedio, para velocidades mayores de rotación.

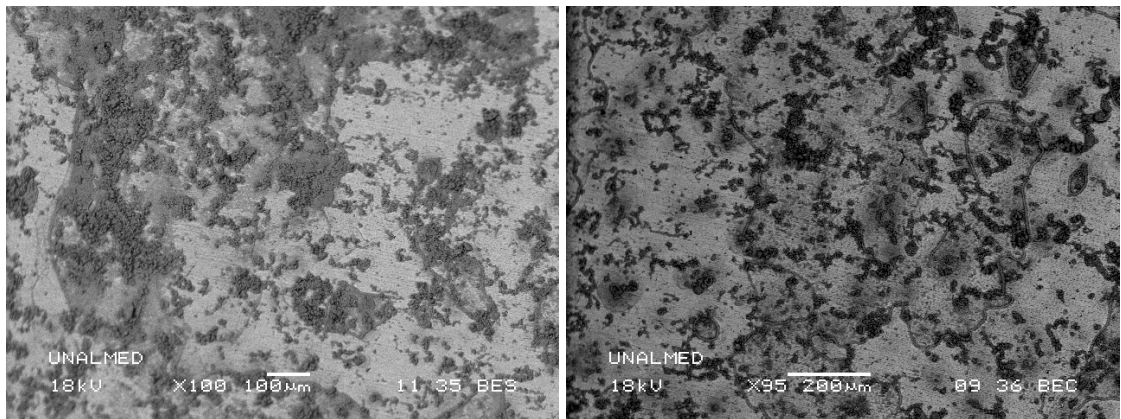
Comparando las ecuaciones 7 al 10 con la tabla 16 y observando las micrografías obtenidas (6 al 9), se puede decir que el mecanismo propuesto de daño para el acero y las condiciones utilizadas es el siguiente: a bajas velocidades se tiene que el régimen que predomina es corrosión-erosión, que es una corrosión asistida por erosión, es por eso que en este rango la concentración de partículas no tiene gran influencia como si ocurre a altas velocidades; donde el régimen predominante es erosión-corrosión, y la característica del fenómeno erosivo tiene una gran importancia.

Las siguientes fotografías se observa como es la morfología de la capa formada sobre el sustrato metálico a bajas y altas velocidades de rotación, iniciando con el fenómeno de corrosión “pura”, seguidos de los regímenes de erosión-corrosión y corrosión-erosión.

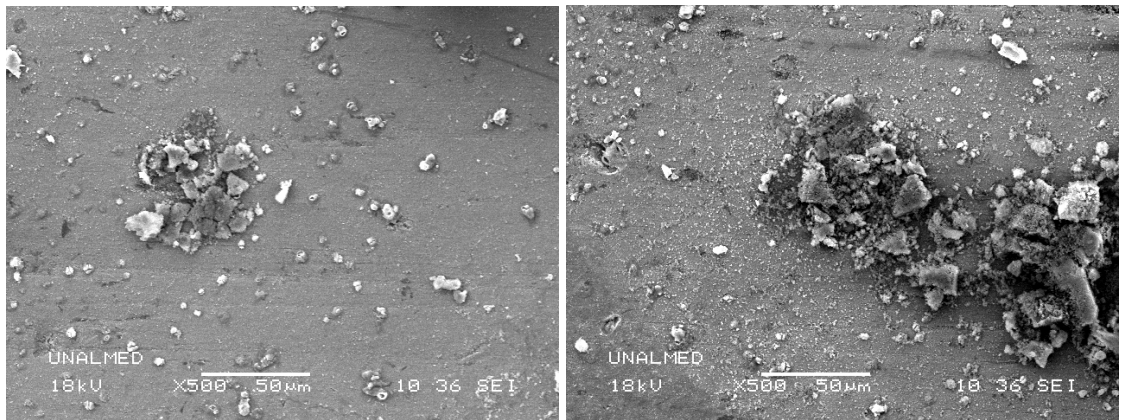
La fotografía 6 describe el proceso de corrosión en ausencia de erosión y se observa las capas de siderita distribuidas en la superficie del material (compuesto formado según la

termodinámica para las condiciones del ensayo), cuando se adiciona partículas erosivas esta capas se forman de manera discontinua o dispersa ya que las partículas destruyen e inhiben la formación de las mismas como se puede apreciar en la fotografía 7, donde el régimen es dado por corrosión-erosión a bajas velocidades de rotación

Fotografía 6. Fenómeno de corrosión en ausencia de erosión Kco



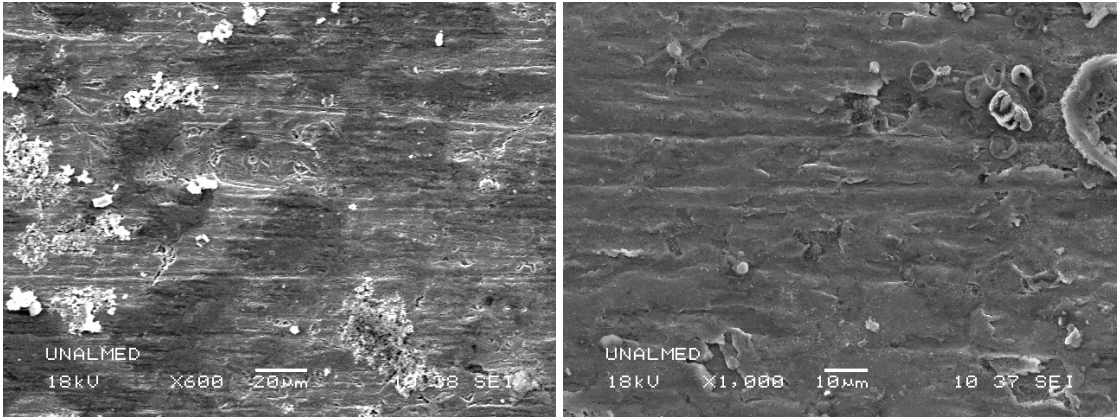
Fotografía 7. Fenómeno de corrosión-erosión a bajas velocidades de rotación



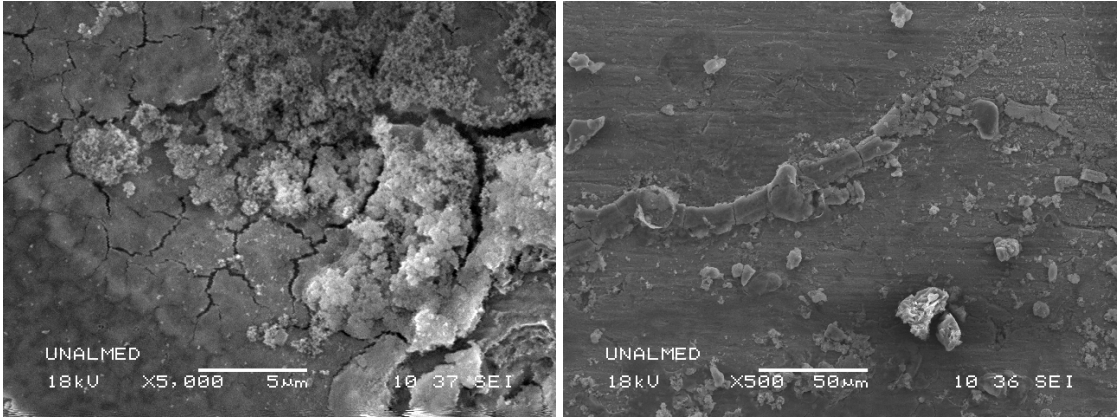
A altas velocidades de rotación y con partículas erosivas se puede observar en la fotografía 8 un deterioro mayor dado por el régimen de erosión-corrosión, donde se puede observar las zonas de desgaste producido por el fenómeno corrosivo junto con la formación de una

película de siderita, la cual es constantemente destruida por los impactos de las partículas sobre la superficie expuesta por el fenómeno de erosión, ver fotografía 9.

Fotografía 8. Fenómeno de erosión-corrosión a altas velocidades de rotación



Fotografía 9. Fractura de la siderita debido al impacto del erosivo



#### 4.6 TRANSFERENCIA DE MASA Y ESFUERZOS DE CORTE

Con los resultados de la técnica de corriente límite se pueden calcular los valores de transferencia de masa junto con los esfuerzo de corte en la pared a diferentes velocidades de rotación obtenidas en el electrodo de cilindro rotatorio, utilizando las ecuaciones 29 y 30.

Tabla 17. Corrientes límite, coeficiente de transferencia de masa y esfuerzos de corte obtenidas experimentalmente en el ECR.

<i>Condiciones</i>	$i_{Límite}(A/cm^2)$	$K (cm/s)$	$Tw (N/m^2)$
1000 rpm	5.1853E-05	7,65E-06	10,9
2000 rpm	7.8993E-05	1,59E-05	33,8
3000 rpm	9.2144E-05	2,68E-05	67,5
1000 rpm 50 $\mu m$ 10 % W	1.0704E-04	3.4762E-04	10,9
1000 rpm 50 $\mu m$ 30 % W	5.5793E-05	1.8120E-04	10,9
1000 rpm 150 $\mu m$ 10 % W	1.1641E-04	3.7807E-04	10,9
1000 rpm 150 $\mu m$ 30 % W	5.6402E-05	1.8317E-04	10,9
2000 rpm 100 $\mu m$ 20 % W	7.5145E-05	2.4405E-04	33,8
3000 rpm 50 $\mu m$ 10 % W	7.0807E-05	2.2996E-04	67,5
3000 rpm 50 $\mu m$ 30 % W	6.9286E-05	2.2502E-04	67,5
3000 rpm 150 $\mu m$ 10 % W	7.0903E-05	2.3027E-04	67,5
3000 rpm 150 $\mu m$ 30 % W	1.2448E-04	4.0427E-04	67,5

Un aumento en la velocidad del sistema, puede aumentar las condiciones agresivas del medio. Se observó un aumento en la corriente límite a medida que se incrementa la velocidad de rotación, esto nos indica que las reacciones son controladas por transferencia de masa, se observa que la corriente límite es proporcional a la velocidad de deterioro del material.

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.

#### **4.7 RUIDO ELECTROQUÍMICO**

Como pruebas electroquímicas adicionales se realizaron ensayos de ruido de voltaje electroquímico, realizadas sobre el acero de estudio bajo las condiciones de corrosión en ausencia de erosión, y el fenómeno combinado de erosión-corrosión, a diferentes velocidad de rotación, realizadas bajo los mismos parámetros planteados anteriormente. Con esta técnica relativamente nueva para estos estudios donde no se involucra una perturbación artificial del sistema de investigación, y que permite una sensibilidad del proceso de corrosión, se pretende confirmar que existe un mecanismo combinado de corrosión-erosión el cual puede cambiar a erosión-corrosión por efecto de las velocidades de rotación del sistema, este método electroquímico desarrollado para este fenómeno es bastante complejo debido a que involucra el movimiento del fluido en el sistema, el análisis de los resultados se realizó por medio de comparación morfológica presentada en las curvas para cada uno de los fenómenos.

**4.7.1 Ruido de voltaje electroquímico para el fenómeno de corrosión.** Los primeros ensayos de ruido de voltaje electroquímico se realizaron para las condiciones de corrosión “pura” en ausencia de partículas abrasivas, siguiendo el mismo procedimiento de montaje y condiciones de ensayos descritas en el numeral 4.2. La forma de la curva para las diferentes velocidades de rotación presenta una morfología característica para el fenómeno de corrosión por  $\text{CO}_2$  como se puede observar en las figuras 21 y 22. Para la condición de 1000 rpm se puede apreciar una curva tenue la cual no presenta sobre saltos en los valores de voltaje indicando que se está presentando un fenómeno de deterioro continuo, al aumentar la velocidad de rotación se evidencia un aumento en la amplitud, este cambio de amplitud es debido a que se incrementa la velocidad de corrosión en el sistema, otra característica importante es que la amplitud de la curva permanece constante a través del tiempo. Se puede establecer como parámetro para este tipo de acero esta morfología de curva para describir el fenómeno de corrosión en ausencia de partículas erosivas. Estas conclusiones son coherentes con los estudios realizados por Wood, ya que estas fluctuaciones de voltaje medidas en el electrodo de trabajo con respecto a un electrodo de referencia (Calomel Saturado) indican el tipo de degradación presentada en el material<sup>[47]</sup>.

Figura 21. Ruido de voltaje a una velocidad de 1000 rpm.

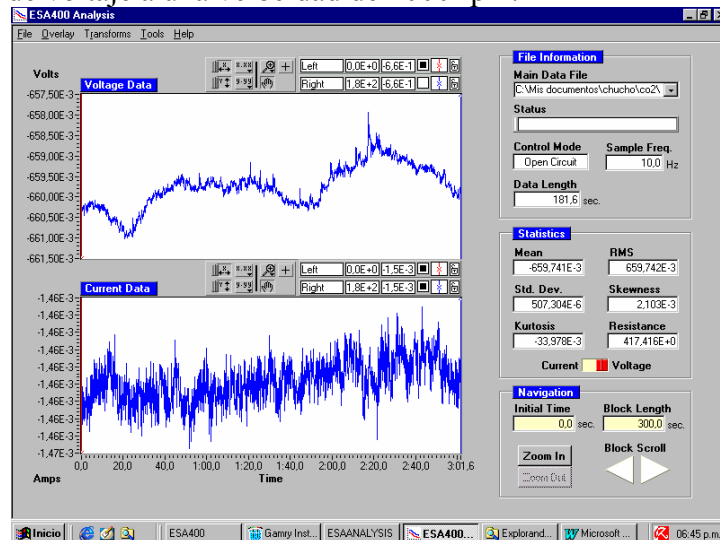
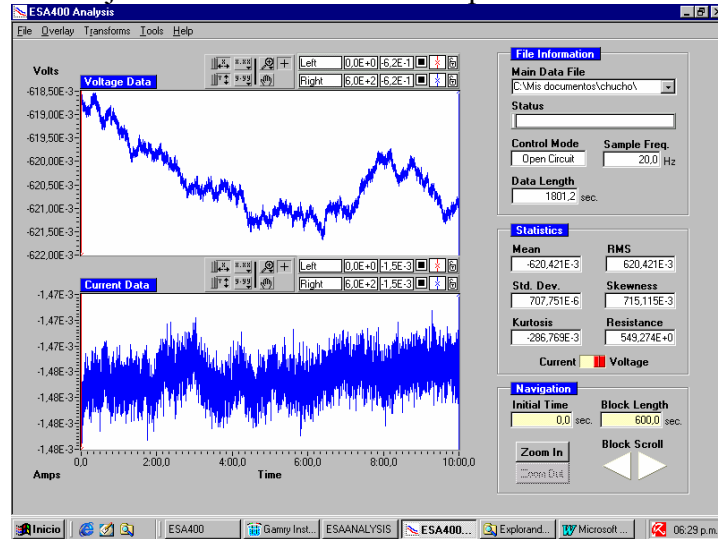


Figura 22. Ruido de voltaje a una velocidad de 3000 rpm



**4.7.2 Ruido de voltaje electroquímico para el fenómeno combinado de erosión-corrosión.** A continuación se describe el comportamiento de las curvas cuando se presenta el fenómeno combinado de erosión y corrosión sobre la superficie del acero AISI SAE 1020. Como se identificaron dos tipos de fenómenos, dependiendo de la velocidad de rotación, se agruparon los ensayos por esta variable que es la que tiene un mayor peso sobre las demás.

**\* Análisis de las curvas a diferentes tamaños y concentraciones de partícula a una velocidad de 1000 rpm.** Al realizar el análisis de las curvas 23 al 26 se observa que presentan una morfología similar y muy parecida a la presentada en el fenómeno de corrosión “pura” lo que lleva a pensar que bajo estas condiciones el fenómeno que predomina es de corrosión sobre el de erosión. Esto se pudo comprobar al realizar los cálculos en la sección anterior, aunque hay que destacar una mayor amplitud lógicamente debido aun deterioro mayor por el efecto del fenómeno combinado también se nota la presencia de una mayor cantidad de picos o fluctuaciones sobre la curva siendo más notoria en la figura 26 donde se presenta una mayor influencia del tamaño y concentración de

partículas como se muestra en los valores de la relación  $K_c/K_e$  y la morfología de la curva. Adicionalmente se realizó una prueba a 2000 rpm donde se observó un aumento en las oscilaciones y amplitud de la curva, pero no se puede asegurar que este sea el límite de transición entre corrosión-erosión y erosión-corrosión.

Figura 23. Ruido de voltaje a 1000rpm, 10%W de partículas con un tamaño de 50 $\mu$ m.

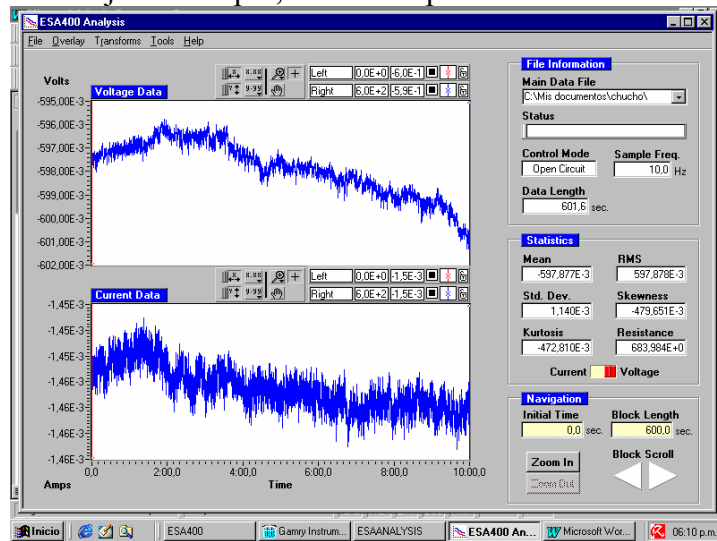


Figura 24. Ruido de voltaje a 1000rpm, 10%W de partículas con un tamaño de 150 $\mu$ m.

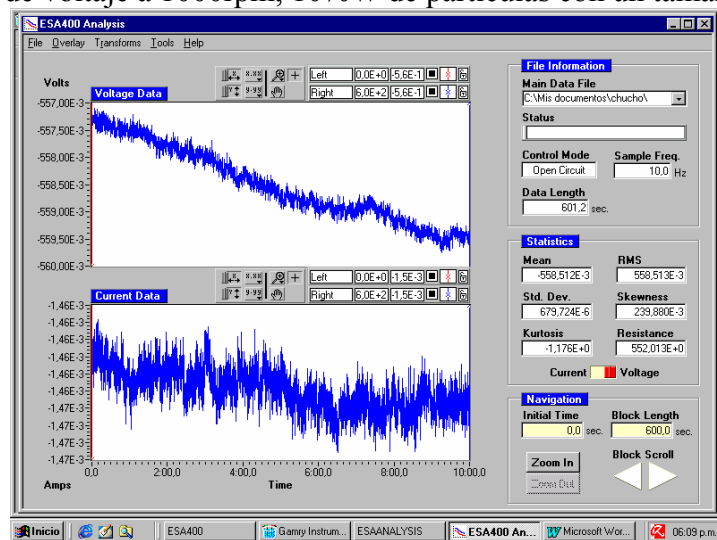


Figura 25. Ruido de voltaje a 1000rpm, 30%W de partículas con un tamaño de 50 $\mu$ m.

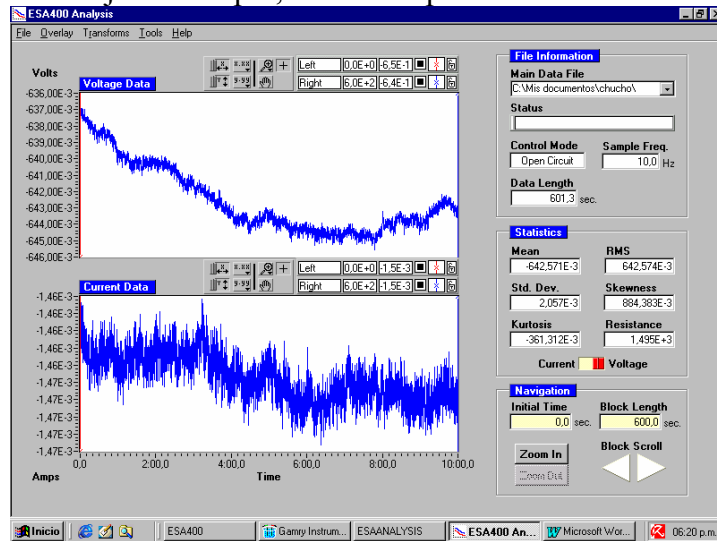


Figura 26. Ruido de voltaje a 1000rpm, 30%W de partículas con un tamaño de 150 $\mu$ m.

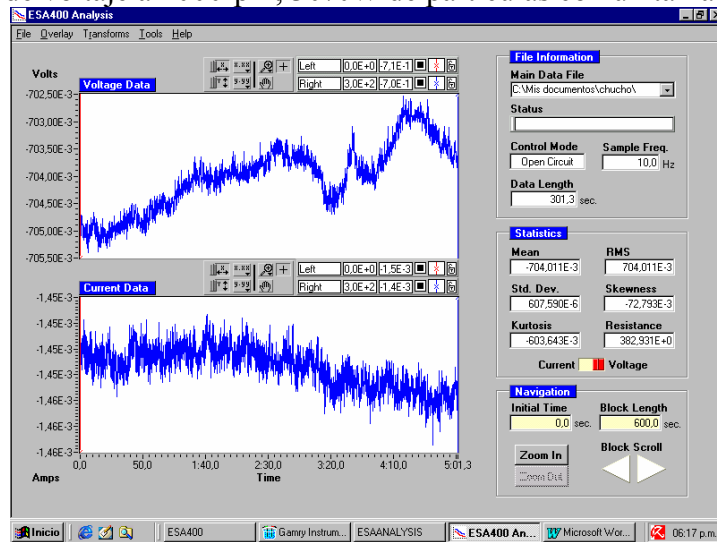
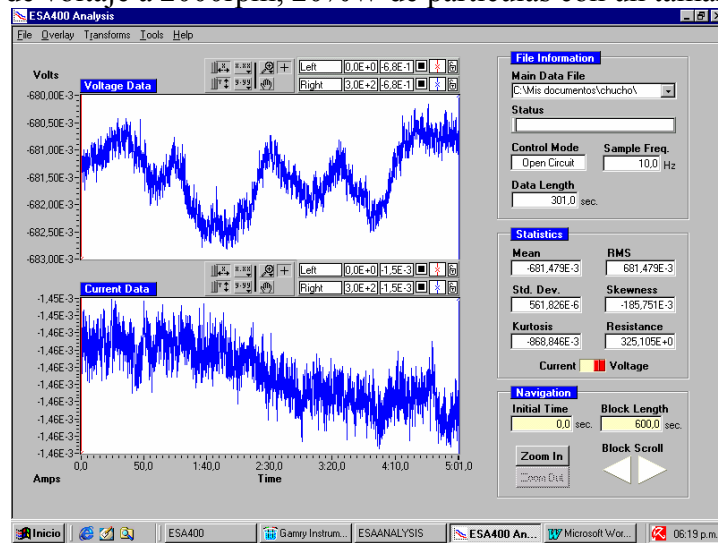
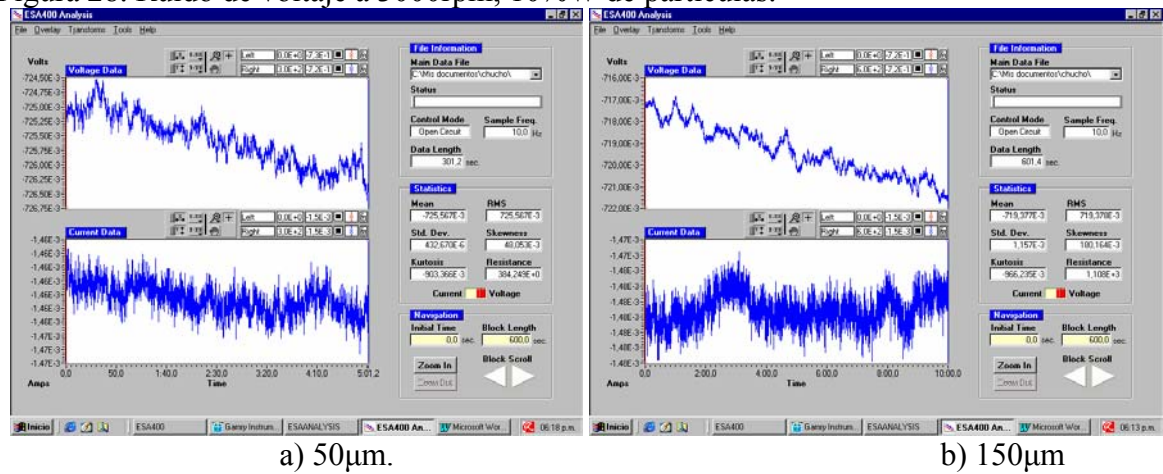


Figura 27. Ruido de voltaje a 2000rpm, 20%W de partículas con un tamaño de 100 $\mu$ m.



\* **Análisis de las curvas a diferentes tamaños y concentraciones de partículas a una velocidad de 3000 rpm.** En estas figuras (28 y 29) se presenta una mayor fluctuación de las señales, las cuales se presentan de manera natural en el potencial de corrosión del electrodo corroído. Las oscilaciones no son completamente determinísticas, típicamente tienen una apariencia caótica principalmente para mayores concentraciones ya que existe la probabilidad de un mayor número de choques de las partículas erosivas.

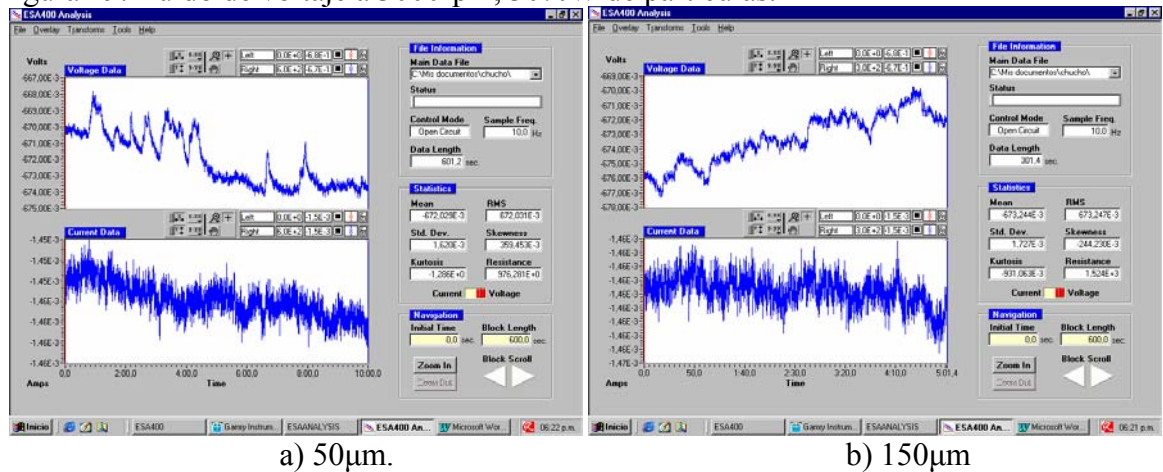
Figura 28. Ruido de voltaje a 3000rpm, 10%W de partículas.



a) 50µm.

b) 150µm

Figura 29. Ruido de voltaje a 3000rpm, 30%W de partículas.



a) 50µm.

b) 150µm

Con la información recopilada se puede construir un mapa de desgaste del material el cual permite conocer cuales son las regiones en las que ocurre el fenómeno de deterioro y protección. El mapa tiene como ejes la velocidad de rotación, tamaño de partícula y concentración de partículas erosivas, ver figura 30 y 31.

Figura 30. Régimen de deterioro del acero al carbono 1020

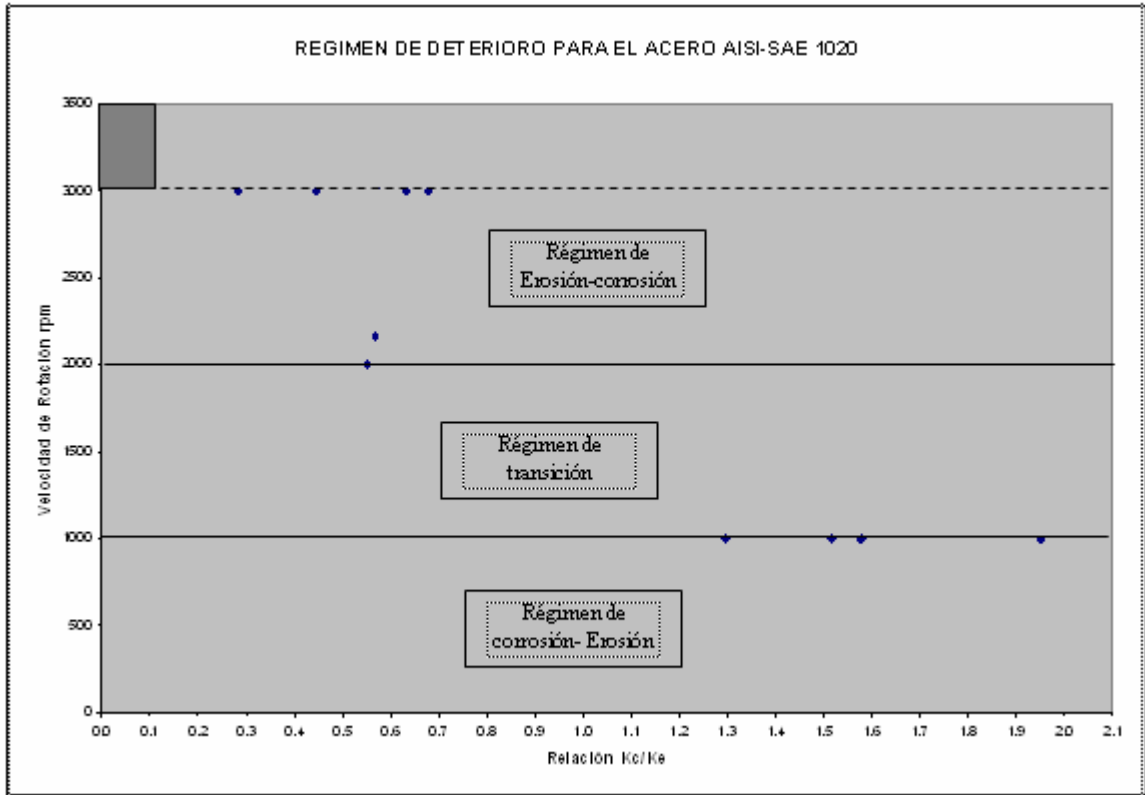
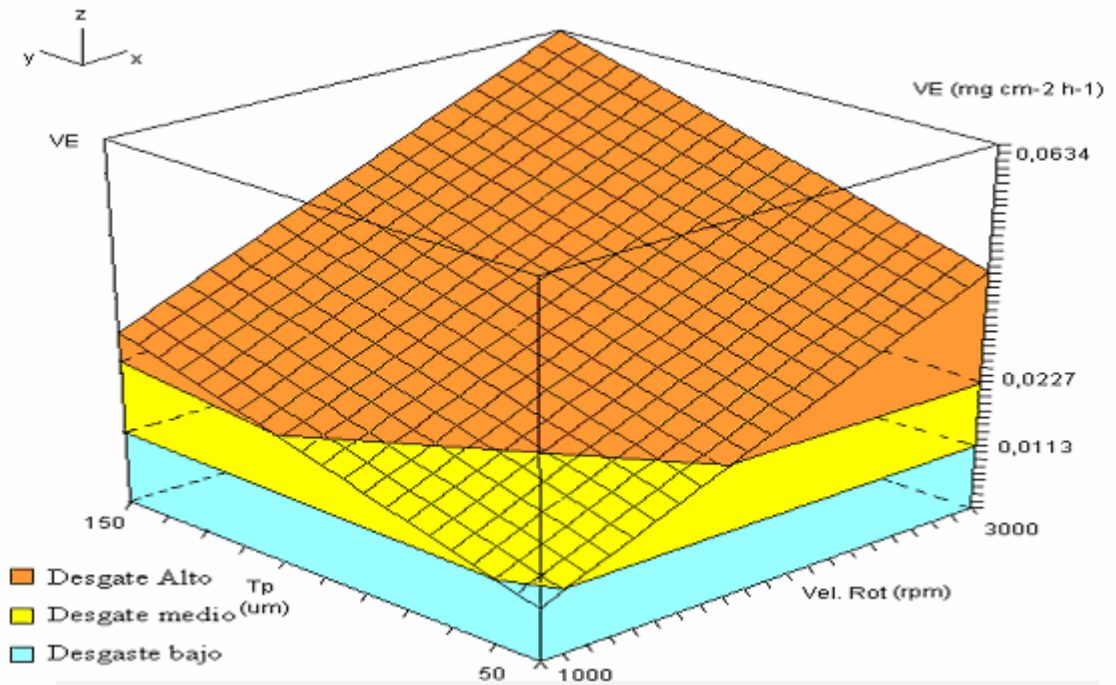


Figura 31. Mapa de desgaste del acero al carbono 1020



## 5. CONCLUSIONES

En el sistema de estudio con adición de diferentes porcentajes de arena, la velocidad de deterioro del acero AISI SAE 1020, está influenciada principalmente por la velocidad de rotación del fluido, y con una contribución menor por el tamaño de partícula y porcentaje de la misma .

La velocidad del fluido y el choque de las partículas contra la superficie del acero remueven la capa de siderita formada a estas condiciones, dejando la superficie del acero nuevamente expuesta al ambiente corrosivo, de modo que la velocidad de corrosión aumenta con respecto al sistema sin partículas. La concentración de partículas, en el rango utilizado, no presentó un efecto considerable en la velocidad de deterioro a velocidades bajas

Se pueden considerar la combinación de dos regímenes erosivos-corrosivos para este sistema; uno a bajas velocidades en las cuales el deterioro es causado principalmente por corrosión-erosión, y otro a velocidades mayores, que se presenta un régimen de erosión-corrosión.

Se puede observar que el fenómeno de erosión-corrosión no es una simple suma algebraica de cada uno de los fenómenos individuales y la sinergia del fenómeno tiene una gran contribución al deterioro del material. ( $K_{e-c} = K_{e0} + K_{c0} + \Delta K_{e-c}$ )

Las concentraciones altas de arena incidiendo sobre la superficie de un acero al carbono a gran velocidad son una amenaza latente para la integridad y la vida en servicio del material, es esencial para la protección de las estructuras un riguroso control sobre esta combinación de variables o en su defecto, establecer una acertada periodicidad del proceso de mantenimiento.

El producto de corrosión formado en este sistema 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 determinó que la etapa controlante del sistema fue la transferencia de masa, ya que las curvas de polarización catódica en los diagramas de Tafel, presentan un acercamiento de la corriente de corrosión a la corriente límite.

Los resultados obtenidos en ruido electroquímico sugieren que a altas velocidades predomina el fenómeno erosivo sobre el corrosivo como se muestra en los picos formados por el impacto de las partículas.

Se construyó experimentalmente un mapa tridimensional de desgaste del acero a las condiciones establecidas y se estableció una ecuación general para describir el fenómeno combinado, el mapa permite establecer las regiones seguras de desempeño del material a las condiciones experimentales.

Los esfuerzos de cortes calculados para el sistema con partículas, no tuvo ninguna diferencia a los calculados para el sistema sin partículas, pero se debe anotar que la formación de la capa de siderita, fue para todos los casos, eliminada por la sílice presente en la solución.

Se construyó una celda para ensayos de erosión-corrosión, la cual es única en el país, que permite estudiar los fenómenos asociados a este tipo de daño

## 6. BIBLIOGRAFÍA

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. VERA, M.; RAGUA N. Efecto de la concentración de partículas erosivas en la corrosión de un acero AISI-SAE 1020 en un sistema salmuera-co<sub>2</sub>-arena. Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica .Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2007
5. BRENTON S., et al. “Is API RP 14E Reliable for Predicting an Erosion Production Velocity when Sand Production is anticipated”, ETCE00-PR054, Feb. 2000, New Orleans, Louisiana.
6. HEITZ, E. Chemo-Mechanical effects of Flow on Corrosion. Corrosion Vol. 47, 1991.
7. NESIC, S.; BIENKOWSKY, J.; and PURCHASE, A. A compact apparatus for testing erosion-corrosion under disturbed flow conditions consisting of a rotating cylinder with a step. Corrosion/02, paper No. 2504, Houston, TX: NACE International, 2004.
8. STACK, M.; CORLETT, N. and TURGOOSE, S. Some thoughts on modeling the effects of oxygen and a Particle concentration on the erosion-corrosion of steels in aqueous slurries. Wear No 255. (2003) p. 225-236
9. JANA, B.; STACK, M. Modeling impact angle affects on erosion-corrosion of pure metals: construction of materials performance maps. Wear No 259. (1 Feb. 2005) p. 243-255
10. ZHOU, S, STACK, M.M. y NEWMAN, R.C. Characterization of synergistic effects between erosion and corrosion in an aqueous environment using electrochemical techniques. Corrosion, paper. NACE international. 1996.

11. He, D.; JIANG, X. and LI, S. erosion-corrosion of stainless steels in aqueous slurries – a quantitative estimation of synergistic effects. Corrosion Science. NACE international. jan 2005.
12. STEPHENSON, D.J.; NICHOLLS, J.R. Wear 186-187 (1995).
13. STACK, M. and PEÑA, D. Surface Coating Technology 113 (1995)
14. STACK, M.; CORLETT, N and ZHOU, S. Wear 203-204 (1997).
15. GARCÍA R. Mónica, ARCHILA Edwin A. “Evaluación de la Corrosión del Acero AISI-SAE 1020 por Medio De Técnicas Electroquímicas En Los Sistemas Hidrodinámicos: 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.
16. FORERO BALLESTEROS, Adriana.”Evaluación Hidrodinámica Del comportamiento De Inhibidores Genéricos Para Sistemas Multifásicos Salmuera-CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S-Hidrocarburo Mediante Aplicación De Técnicas Electroquímicas”.Trabajo de Investigación. 2004.
17. VILLAREAL CELIS, Jaime. corrosión en sistemas multifásicos en flujo intermitente, caso CO<sub>2</sub>, agua, aceite, sobre acero al carbono 1020. tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 2001
18. PÉREZ, J. y NUNCIRA, S. Efecto de la microestructura sobre la corrosión de aceros en soluciones acuosas conteniendo CO<sub>2</sub>", Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica .Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Noviembre 2000.
19. ANDERKO, A. Simulation of FeCO<sub>3</sub>/FeS scale formation using thermodynamic and electrochemical models”. Paper No 102, Corrosion international, 2000.
20. BOCKRIS, J. Electrochemical Acta Vol. 29. 1962, p 325-326
21. SALAMA, M. Development of a predictive model for activation-controlled corrosion of Steel in solutions containing carbon dioxide. Corrosion, Vol. 53, No 11, 1997, p 852.
22. WAARD C. and MILLIAMS D.E. Prediction of carbonic acid corrosion in natural gas pipelines. First int. Conferences “Internal and external protection of pipes”. University of Durham, September 1975

23. 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.
24. 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.
25. RAO, P.V. and BUCKLEY, D.H. Characterization of solid particle erosion resistance of ductile metals based in their properties. Paper, Wear. Elsevier. 1985.
26. LEVY, A. The Platelet Mechanism of Erosion of Ductile Metals. Paper, Wear. Elsevier. 1986.
27. CLARK, H. Particle Velocity and Size Effects in Laboratory Slurry Erosion Measurements or...do you know what your particles are doing. Paper, Wear. Elsevier. 2002.
28. FINNIE, I. Erosion of Surfaces by Solid Particles. Paper. Wear, Vol. 3. 1960.
29. GOODWIN, J.E., SAGE, W. and TILLY, G.P. Study of erosion by Solid Particles. Proc. Of Inst. of Mech. Eng. Vol. 184. 1970.
30. BITTER, J. G. A. A Study of Erosion Phenomena. Paper. Wear. 1963.
31. PUNGWIWAT, N. PhD tesis, UMIST, UK. 1999.
32. 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.
33. BROWN, R. JIN JUN, E and EDINGTON, J. Mechanisms of Erosive Wear for 90° Impact on Cooper and Iron Targets. Paper, Wear. Elsevier. 1981
34. CLARK, H. Mcl. A comparison of the erosion resistance of casing steels by sand-oil suspensions. Paper, Wear. Elsevier. 1991.
35. HATTORI, S. and NAKAO, E. Cavitation Erosion and Quantitative Evaluation based on Erosion Particles. Paper, Wear. Elsevier. 2001.

36. 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.
37. YOUNG, J. P. y RUFF, A.W. Particle Erosion Measurements on Metals. Trans. of ASME. Journal of Materials and Technology. 1977
38. HOCKEY, B. WIEDERHORN, S. and JOHNSON, H. Erosion of Brittle Materials by Solid Particle Impact, Fracture Mechanics of Ceramics. Proc. of Intl. Sym. of Frac. Mech. of Ceramics. 1978.
39. SUNDARARAJAN, G. The Solid Particle Erosion of Metallic Materials at Elevated Temperatures. Paper 11. Proc. of Conf. on Corrosion-Erosion-Wear of Materials at Elevated Temperature. Corrosion, paper. NACE. 1990.
40. COTTIS Robert, TURGOOSE Stephen. "Electrochemical Impedance and Noise". NACE international. Series Editor. 1999.
41. J. VILLARREAL, "Evaluación de la corrosión de aceros al carbono N-80, P-110 y aceros al Cromo en ambientes de CO<sub>2</sub> de un pozo de petróleo", tesis en Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 1.995.
42. FONTANA M. G. Corrosion Engineering. New York: McGraw-Hill, 1978
43. ARANGO B. y SUÁREZ, C. Comportamiento a la Corrosión en aceros API N80 y AISI-SAE 1020 en soluciones de NaHCO<sub>3</sub>, CO y Cl. Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Noviembre 1997
44. PRIMER CONGRESO NACE REGIÓN LATINOAMERICANA. Estudios electroquímicos de corrosión en la industria petrolera. memorias 1994.
45. VILLAREAL, J. Corrosión en sistemas multifásicos en flujo intermitente, caso CO<sub>2</sub>, agua, aceite, sobre acero al carbono 1020" Trabajo de grado Universidad Industrial de Santander -2003
46. BARRIOS, J. Study of parameters related to CO<sub>2</sub> corrosion of API N80 and 1018 carbon steels under two-phase flow conditions. 2002
47. WOOD R.; et al. Investigation of erosion-corrosion processes using electroquimical noise measurements. Tribology International 2002.

48. ANAYA, H. evaluación de inhibidores de corrosión en caliente, en aleaciones 2¼cr-1mo, 9cr-1mo modificado y 304H, en contacto con una sal fundida por medio de métodos electroquímicos, Tesis de Maestría 2005.
49. URUCHURTU, J. and MALO, J. Electrochemical Noise as a Powerful Electrochemical Technique for Corrosion Studies. Research Trends, Trends in Corrosion Research. Vol. 2. 1997. p.49.
50. COTTIS, R. and TURGOOSE, S. Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy Series. Ed. B. Syrett. NACE.1999.
51. COTTIS, R. Interpretation of Electrochemical Noise Data. Corrosion. Vol. 57. 2001. p. 265.
52. SUAREZ, M. T. Evaluación de la corrosión de un sistema O2-Salmuera-Acero AISI SEA 1020 por medio de técnicas electroquímicas. Trabajo de Grado de Maestría Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander Bucaramanga 2004.
53. ZUGIÑA, A. Evaluación de la resistencia a la erosión de un acero AISI SAE 1020 en un sistema multifásico agua-sílice-nitrógeno. Trabajo de Grado Ingeniería Metalúrgica. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Diciembre 2006.