

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Evaluación de corrosión por biocrudo en pruebas de flujo
dinámico.**

Daniela Fernanda Camino Guerra

Christian Santiago Córdova Guevara

Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 11 de diciembre del 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Evaluación de corrosión por biocrudo en pruebas de flujo dinámico

Daniela Fernanda Camino Guerra

Christian Santiago Córdova Guevara

Calificación:

/

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño, PhD.

Marco León, M.Sc

Firma del profesor:

Quito, 11 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Daniela Fernanda Camino Guerra

Códigos: 00124023

Cédula de identidad: 1722822739

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Christian Santiago Córdova Guevara

Códigos: 00129042

Cédula de identidad: 1719050906

Lugar y fecha: Quito, 11 de diciembre de 2019

RESUMEN

Se realizan en este trabajo pruebas de corrosión dinámica en una máquina que contiene dos experimentos diferentes, denominados jet impingement y cilindro rotativo para ser comparados con lo que sucede en un oleoducto común, con el objetivo de comprender el comportamiento corrosivo del biocrudo, analizando tanto las pérdidas de masa como la tasa de corrosión que sufren las probetas tras la exposición al fluido, el cual atraviesa las tuberías del mecanismo. De modo que se obtiene el conocimiento acerca del material más idóneo entre los comunes para usarlo en las aplicaciones que manejan este fluido, mediante la exposición de 9 horas de probetas de dos materiales: acero 1018 y acero API 5LX65 cuya geometría depende del tipo de experimento. Tras culminar con el número de probetas y series introducidas en la máquina se obtiene como resultado que la corrosión producida en las probetas en el experimento de jet impingement se acerca más a la corrosión existente en la prueba que simula el oleoducto, esto quiere decir que la corrosión producida con la prueba de cilindro rotativo resulta más alejada de lo que sucede en la realidad. Además, que el acero API 5LX65 presenta mayor resistencia a la corrosión en comparación al acero 1018. Adicionalmente, se realiza una prueba en la que se crea una celda galvánica, utilizando agua salina para conocer si es que el comportamiento electroquímico de las probetas de grafito se asemeja al del electrodo de referencia de grafito, dando como resultado que las curvas de potencial en función del tiempo que más se asemejan son las del flujo interno y jet impingement.

Palabras clave: 1018 steel, API 5LX65 steel, corrosion, bio, impingement jet, rotating cylinder, internal flow, galvanic cell, saline water

ABSTRACT

Dynamic corrosion tests are performed in this work on a machine that contains two different experiments, called jet impingement and rotary cylinder to be compared with what happens in a common pipeline, with the aim of understanding the corrosive behavior of the biocrude, analyzing both the mass losses such as the corrosion rate suffered by the specimens after exposure to the fluid, which crosses the pipes of the mechanism. So that the knowledge about the most suitable material among the common ones is obtained for use in the applications that handle this fluid, by exposing 9 hours of specimens of two materials: 1018 steel and API 5LX65 steel whose geometry depends on the type of experiment. After culminating with the number of specimens and series introduced in the machine, it is obtained that the corrosion produced in the specimens in the jet impingement experiment is closer to the corrosion existing in the test that simulates the pipeline, this means that the Corrosion produced with the rotating cylinder test is further away from what happens in reality. In addition, API 5LX65 steel exhibits greater corrosion resistance compared to 1018 steel. Additionally, a test is performed in which a galvanic cell is created, using saline water to know if the electrochemical behavior of the graphite specimens resembles that of the graphite reference electrode, so that it results in the potential curves as a function of time that most closely resemble are those of internal flow and jet impingement.

Key words: 1018 steel, API 5LX65 steel, corrosion, biocrub, impingement jet, rotating cylinder, internal flow, galvanic cell, saline water

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
2.1	Materiales	19
2.2	Métodos.....	21
2.2.1	Banco de pruebas	21
2.2.1.1.	<i>Prueba de Flujo Interno (FI).....</i>	<i>24</i>
2.2.1.2.	<i>Prueba de Jet Impingement (JI)</i>	<i>25</i>
2.2.1.3.	<i>Prueba de Cilindro Rotativo (CR).....</i>	<i>27</i>
2.2.2	Comprobación del mecanismo	29
2.2.3	Tasa de corrosión por pérdida de masa.....	29
2.2.4	Prueba de electrodo de referencia con respecto a las probetas de grafito	31
2.2.5	Tasa de corrosión por potencial por medio de potencióstato	32
2.2.6	Limpieza del mecanismo.....	33
3.	RESULTADOS	34
3.1.	Mediciones de tasa de corrosión por pérdida de masa	34
3.2	Análisis metalográfico.....	36
3.3	Prueba de medición de potencial del electrodo de referencia con respecto a las probetas de grafito.....	38
4	DISCUSIÓN	45
5	CONCLUSIONES.....	46
6	REFERENCIAS	49
	ANEXO A: METALOGRAFÍAS PREVIAS Y POSTERIORES A LA CORROSIÓN DE LOS MATERIALES	52
	ANEXO B: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOCRUDO.....	68
	ANEXO C: FUNCIONAMIENTO Y LIMPIEZA DE LA MÁQUINA.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición química del acero 1018.</i>	20
Tabla 2. <i>Propiedades físicas del acero 1018.</i>	20
Tabla 3. <i>Propiedades eléctricas del acero 1018.</i>	20
Tabla 4. <i>Composición química del acero API 5LX65.</i>	20
Tabla 5. <i>Propiedades mecánicas del acero API5LX65.</i>	20
Tabla 6. <i>Partes del banco de pruebas inicial</i>	22
Tabla 7. <i>Partes del banco de pruebas final</i>	23
Tabla 8. <i>Partes del mecanismo del flujo interno</i>	25
Tabla 9. <i>Partes del mecanismo del jet impingement</i>	27
Tabla 10. <i>Partes del mecanismo del cilindro rotativo</i>	29
Tabla 11. <i>Caracterización de la tasa de corrosión de aceros al carbono.</i>	31
Tabla 12. <i>Resultados de masa de las probetas de cada experimento de los materiales acero 1018 y al API 5LX65</i>	34
Tabla 13. <i>Pérdidas de masa de las probetas de materiales acero 1018 y API 5LXG5</i>	34
Tabla 14. <i>Milésimas de pulgada por año de las probetas de materiales acero 1018 y API 5LXG5</i>	35
Tabla 15. <i>Resultados del microscopio óptico de los experimentos a magnificación 100X</i>	36
Tabla 16. <i>Datos obtenidos durante la exposición de 30 minutos del acero 1018 en agua salina de los experimentos</i>	38
Tabla 17. <i>Datos obtenidos durante la exposición de 30 minutos del acero API 5LX65 en agua salina de los experimentos</i>	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corrosión de tuberías	12
<i>Figura 2. Experimento de Flujo interno.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3. Experimento de Jet impingement.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Experimento de cilindro rotativo.....</i>	<i>15</i>
Figura 5. Sistema del potencióstato.....	18
Figura 6. Diagrama de flujo del mecanismo inicial.....	21
Figura 7. Modelo inicial del banco de pruebas.....	21
<i>Figura 8. Modelo final del mecanismo</i>	<i>22</i>
<i>Figura 9. Vista lateral del modelo final</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10. Vista lateral del modelo final</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11. Mecanismo del flujo interno</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12. Mecanismo del Jet Impingement.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 13. Componentes del jet impingement.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 14. Mecanismo del cilindro rotativo.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 15. Componentes del cilindro rotativo</i>	<i>28</i>
Figura 16. Celda Galvánica con agua salina	32
<i>Figura 17. MPY de experimentos para acero 1018</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18. MPY de experimentos para acero API 5LX65.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Potencial Jet Impingement 1018 vs tiempo</i>	<i>39</i>
<i>Figura 20. Potencial cilindro rotativo 1018 vs tiempo</i>	<i>39</i>
<i>Figura 21. Potencial flujo interno 1018 vs tiempo.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 22. Potencial Jet Impingement API vs tiempo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 23. Potencial cilindro rotativo API vs tiempo</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24. Potencial flujo interno API vs tiempo</i>	<i>42</i>
<i>Figura 25. Potencial jet impingement 1018 vs tiempo (sin pulido correcto).....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 26. Potencial cilindro rotativo 1018 vs tiempo (sin pulido correcto).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 27. Potencial flujo interno 1018 vs tiempo (sin pulido correcto)</i>	<i>43</i>
<i>Figura 28. Potencial jet impingement API vs tiempo (sin pulido correcto)</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29. Potencial cilindro rotativo API vs tiempo (sin pulido correcto).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 30. Potencial flujo interno API vs tiempo (sin pulido correcto).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 31. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero 1018</i>	<i>52</i>
<i>Figura 32. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero 1018</i>	<i>52</i>
<i>Figura 33. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero 1018</i>	<i>52</i>
<i>Figura 34. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero 1018 corroído</i>	<i>53</i>

<i>Figura 35. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero 1018 corroído</i>	53
<i>Figura 36. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero 1018 corroído</i>	53
<i>Figura 37. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero 1018</i>	54
<i>Figura 38. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero 1018</i>	54
<i>Figura 39. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero 1018</i>	54
<i>Figura 40. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído</i>	55
<i>Figura 41. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído</i>	55
<i>Figura 42. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído</i>	55
<i>Figura 43. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero 1018</i>	56
<i>Figura 44. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero 1018</i>	56
<i>Figura 45. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero 1018</i>	56
<i>Figura 46. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	57
<i>Figura 47. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	57
<i>Figura 48. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	57
<i>Figura 49. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero 1018</i>	58
<i>Figura 50. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero 1018</i>	58
<i>Figura 51. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero 1018</i>	58
<i>Figura 52. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	59
<i>Figura 53. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	59
<i>Figura 54. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero 1018 corroído</i>	59
<i>Figura 55. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero API 5LX65</i>	60

<i>Figura 56. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero API 5LX65</i>	60
<i>Figura 57. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero API 5LX65</i>	60
<i>Figura 58. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído</i>	61
<i>Figura 59. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído</i>	61
<i>Figura 60. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído</i>	61
<i>Figura 61. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero API 5LX65</i>	62
<i>Figura 62. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero API 5LX65</i>	62
<i>Figura 63. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero API 5LX65</i>	62
<i>Figura 64. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído</i>	63
<i>Figura 65. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído</i>	63
<i>Figura 66. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído</i>	63
<i>Figura 67. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	64
<i>Figura 68. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	64
<i>Figura 69. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	64
<i>Figura 70. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído</i>	65
<i>Figura 71. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído</i>	65
<i>Figura 72. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído</i>	65
<i>Figura 73. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	66
<i>Figura 74. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	66
<i>Figura 75. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65</i>	66
<i>Figura 76. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído</i>	67

<i>Figura 77. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 78. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído.....</i>	<i>67</i>

1. INTRODUCCIÓN

Las tuberías al contener fluidos que las atraviesan pueden resultar corroídas, ocasionando que los materiales de estas se deterioren, debido a que su entorno ha sufrido un ataque electroquímico, de manera que necesiten mantenimiento o ser reemplazadas para que puedan continuar con su función. Según la norma ISO 8044 “corrosión es la interacción físico-química entre un metal y su medio ambiente, que ocasiona modificaciones en las propiedades de un metal, y a menudo una degradación de las funciones del mismo, del medio o del sistema técnico del cual forma parte”; por lo tanto, se puede interpretar que las tuberías se pueden ver afectadas por el flujo al cual se ven sometidas, provocando daños en ellas por lo cual deben ser reparadas o reemplazadas con la mayor brevedad posible para que se puedan seguir utilizando con normalidad. En la figura 1 se puede observar como son las tuberías que presentan corrosión.



Figura 1. Corrosión de tuberías. (Scalebuster, s.f).

En este trabajo se estudiará la corrosión de probetas de dos materiales, que se denominan acero 1018 y acero API 5LX65, contenidas en dos experimentos: el primero “jet impingement” y el segundo “cilindro rotativo” para comparar la corrosión dinámica producida en cada uno, con relación a la que sufrirían en la prueba de flujo interno. En esta última prueba se utiliza un tubo que se encuentra unido a una serie de arandelas del mismo diámetro de distintos materiales, haciendo referencia al electrodo de trabajo y al electrodo auxiliar; además en la tubería se realiza un pequeño agujero por el cual se introduce el

electrodo de referencia. El propósito de esta prueba es simular el comportamiento normal de un fluido dentro de una tubería. Se puede observar este sistema en la figura 2.

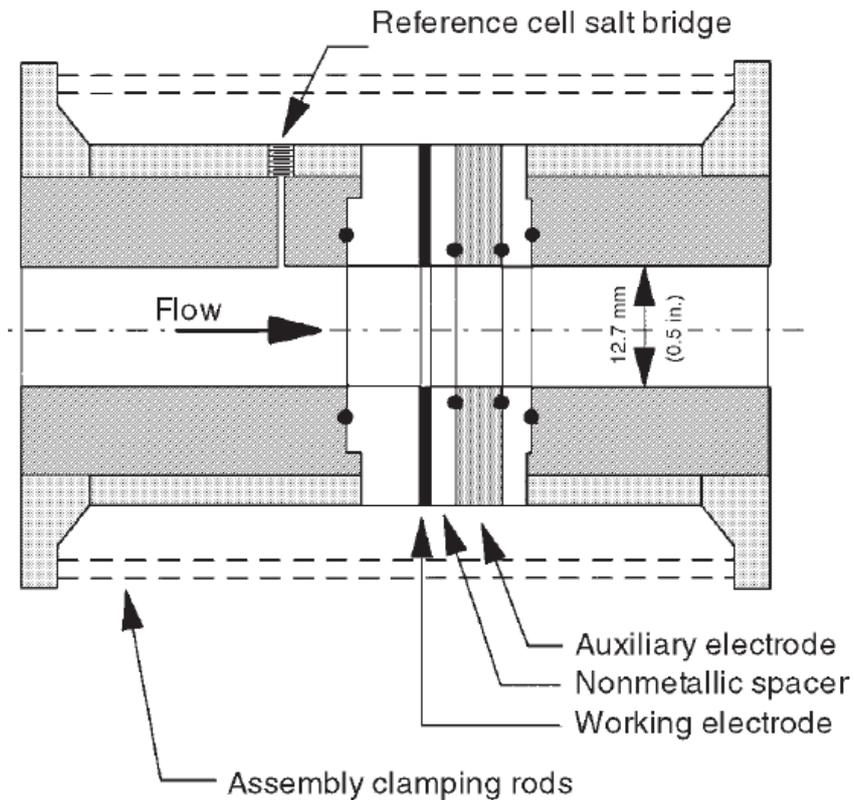


Figura 2. Experimento de Flujo interno. (Efird,1993)

El experimento jet impingement es un mecanismo en el cual se reduce el área transversal de una tubería contenida dentro de un recipiente, generando que salga disparado un chorro del fluido hacia una probeta, la cual resulta sometida a un flujo corrosivo más fuerte debido al chorro que la dispara, este mecanismo se puede apreciar en la figura 3.

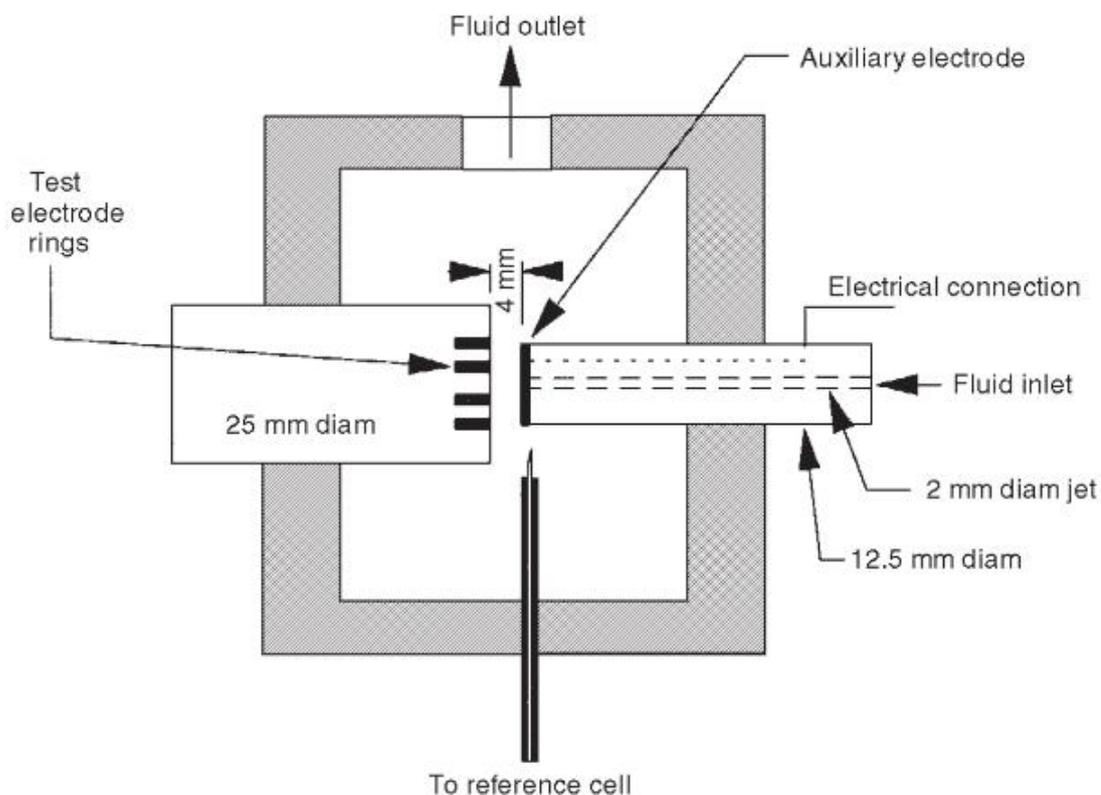


Figura 3. Experimento de Jet impingement. (Efird, 1993)

El experimento cilindro rotativo se trata de un recipiente que se encuentra conectado a un motor y este a su vez a la probeta a corroer provocando el movimiento rotacional de la misma, simulando un flujo laminar, el cual se comporta corrosivamente alrededor de la probeta. La figura 4 muestra la geometría de este sistema.

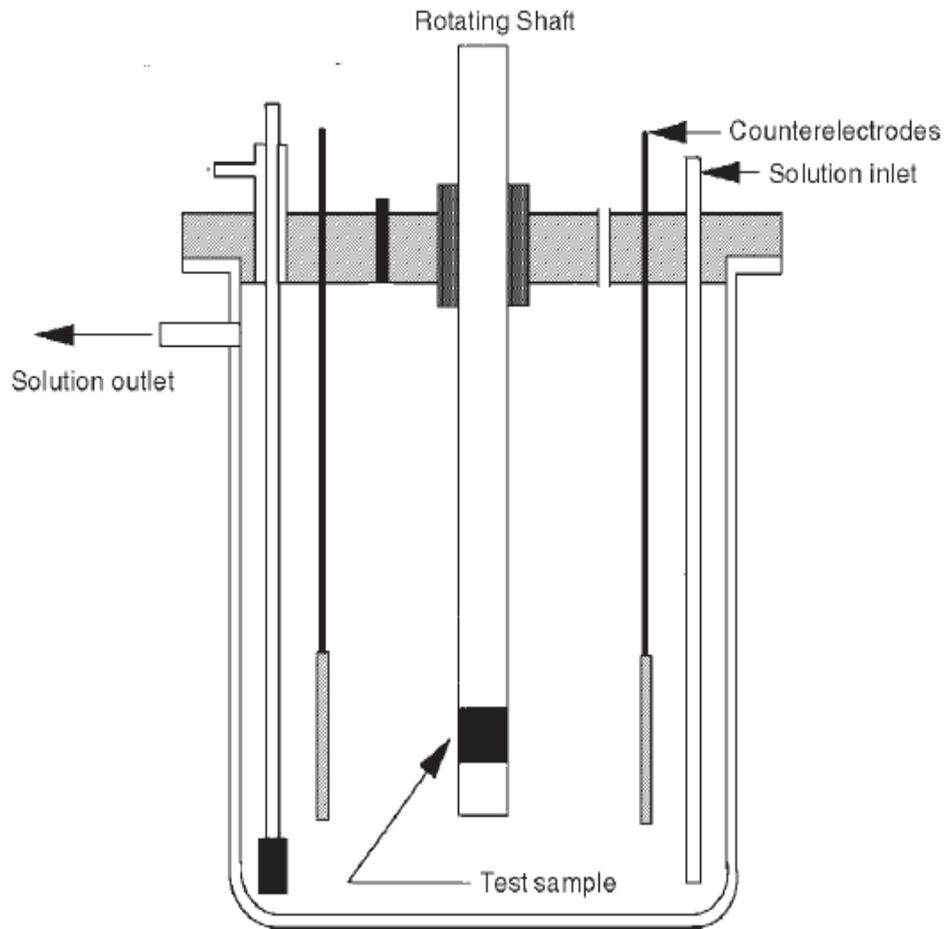


Figura 4. Experimento de cilindro rotativo. (Efird, 1993)

El diseño y construcción de estos experimentos se realizó en un trabajo previo, basándose en el documento de Efird, en el que se mencionan las características que debe contener cada experimento individualmente, de modo que se planificó elaborar un mecanismo en el que las tres pruebas puedan trabajar de manera simultánea dentro de un circuito formado por tuberías y accesorios; con el objetivo de que la comparación que se realice se encuentre bajo las mismas condiciones experimentales, debido a que de este modo se pueden obtener de manera precisa los resultados y de esta manera que no existen variables externas que influyan en el análisis.

Por medio del prototipo que se ha construido se pueden realizar varios experimentos con los cuales se puede concluir cuál sería el material idóneo para utilizarse en tuberías las

cuales pueden verse corroídas al trabajar por largos períodos de tiempo ante fluidos que ocasionen este daño. Para esta investigación que se llevará a cabo se ha escogido el biocrudo como el fluido que será utilizado para los experimentos, ya que se desconoce su comportamiento dentro de un mecanismo de tuberías, sobre todo su capacidad corrosiva ante ciertos materiales.

Este fluido adicionalmente ha sido escogido, debido a que en la industria puede ser usado como reemplazo del petróleo, con el motivo de que se necesita una nueva fuente que lo sustituya, ya que los pozos petroleros escasean. Adicionalmente, esta alternativa provendría de recursos naturales renovables, y ayudaría en el tema medio ambiental (Takht, 2019), debido a que su extracción no es tan contaminante como la del petróleo. Además, se conoce que el petróleo es un recurso limitado que se utiliza en la mayoría de las maquinarias industriales, bajo este principio se puede observar que este recurso empieza a agotarse con velocidad, por este motivo es que se acerca el futuro en el cual el petróleo se agote y ya no se pueda acceder a más lugares para poder explotarlo (RT, 2015). Debido a esto, una de las mejores opciones para reemplazarlo es el biocrudo por sus propiedades similares y composición orgánica.

Sin embargo, según Keiser, se necesita disminuir el nivel de acidez que contiene el biocrudo para realizar el reemplazo, ya que sus componentes principales son el oxígeno, el hidrógeno, el carbono y nitrógeno, así como también en el Anexo B se presentan los demás compuestos que lo constituyen; adquiriendo un TAN de 108, debido a que su pH es bajo de aproximadamente 3,4, tratándose de un fluido corrosivo (Keiser, 2012). Además, según Takht en comparación al petróleo, se debe prevenir en las aplicaciones en las que se use biocrudo debido a sus problemas de corrosividad y baja estabilidad, ocasionados por su alto nivel de oxígeno. Su obtención proviene de la biomasa, obtenida a partir del proceso de pirólisis. En este caso se usa un biocrudo a partir de la pirólisis catalítica de hule de llanta, en la que se

emplea un catalizador sólido que contiene una mezcla de zeolita ácida y gama lúmina, con una acidez de 0.65 por cada gramo; en este proceso se toman en cuenta tres factores que son: temperatura, tiempo de reacción y cantidad de catalizador; adicionalmente, dependiendo del volumen de hule de llanta expuesto a este proceso, se obtendrá el porcentaje de rendimiento correspondiente del biocrudo para que se obtenga el producto final de este combustible líquido. (Gestores de Residuos, 2017).

Con el objetivo de que el reemplazo de petróleo por biocrudo sea factible en la industria, Efirid en su estudio sometió a distintos aceros que se usan comúnmente al biocrudo para analizar cuales presentan mayor resistencia a ser corroídos por este fluido, de manera que se conozcan los materiales idóneos a utilizar en aplicaciones que requieran utilizar biocrudo. De igual manera, en este trabajo se analizarán a las probetas de acero 1018 y acero API 5LX65, utilizando herramientas de laboratorio para conocer el estado de cada una de las probetas tras la corrosión ocasionada a lo largo de cada prueba realizada en los experimentos mencionados, y la comparación de la corrosión entre los experimentos de jet impingement y cilindro rotativo con relación a la prueba de flujo interno.

Además, se planteará el uso de un potencióstato, el cual funciona como un dispositivo electrónico que impone un potencial constante o variable con respecto al electrodo de referencia de platino con ayuda del electrodo auxiliar de grafito de cada experimento, con el propósito de analizar el potencial de las probetas de los aceros de cada uno de los experimentos, los cuales se utilizan como electrodos de trabajo, de manera que al estar inmersos en el medio conductor, es decir el fluido (biocrudo) se puedan representar los datos de la densidad de corriente, medidos en miliamperios por centímetro cuadrado en función del potencial de las probetas, medido en voltios (Arrieta, 2014); para esto se necesita el uso de cada uno de los experimentos: jet impingement, cilindro rotativo y flujo interno con sus

respectivas conexiones mediante alambre de cobre al potencioestado, y este a su vez a la computadora. En la figura 5 se presenta este sistema

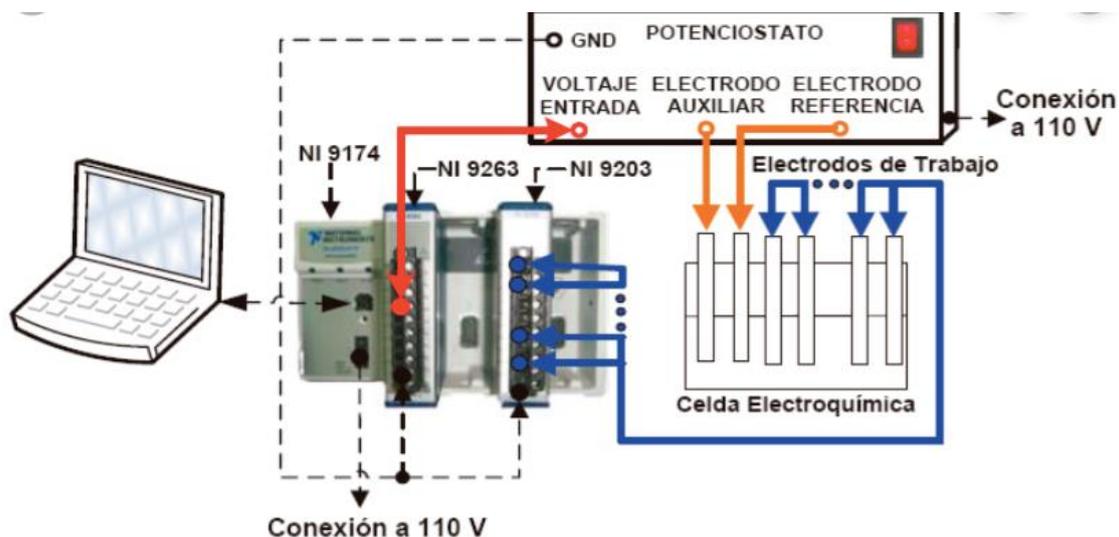


Figura 5. Sistema del potencioestado. (Arrieta, Tarazona, 2014)

Adicionalmente, se realizará una prueba utilizando una celda galvánica empleando agua salina, en la que se colocan los electrodos de referencia de cada prueba, o en su lugar el electrodo de referencia de grafito de laboratorio, con las respectivas probetas de los dos aceros mencionados, con el objetivo de analizar las curvas de comportamiento de potencial en función del tiempo de las probetas de grafito y el electrodo de referencia del mismo material para verificar su comportamiento similar dentro de un ambiente electroquímico, y se conozca si es que se puede emplear probetas de grafito en lugar del electrodo de referencia de grafito en distintas aplicaciones de laboratorio.

Es importante destacar como objetivos de este trabajo que se necesitan realizar todas las correcciones y ensamblaje final de la máquina, para su uso continuo y libre de fugas para que se la emplee en las pruebas de corrosión dinámica y se pueda analizar cuál de los experimentos se asemeja más a la corrosión experimentada en las probetas de la prueba de flujo interno. Así mismo, saber cuál de los dos materiales a utilizar presenta una mayor resistencia a ser corroído, utilizando herramientas de laboratorio para conocer el estado de las

probetas previo y posterior a la corrosión, determinando el tipo de corrosión que sufren, y de esta forma poder comparar sus resultados. Adicionalmente se necesita corroborar el uso de las probetas de grafito de los experimentos en lugar del electrodo de referencia de grafito para posibles experimentos de laboratorio en los que no se utilice este último, pero se necesite el empleo de un sustituto que contenga su mismo comportamiento electroquímico.

Se espera que como menciona Efird, la corrosión que resulte del experimento de jet impingement se asemeje más a la corrosión del flujo interno, así mismo, que las probetas de acero API 5LX65 sufran una corrosión menor al ser sometidas al biocrudo en los experimentos, de modo que su cambio de peso no sea tan significativo como lo que ocurriría en las del acero 1018. Por último, se espera comprobar que las probetas de grafito de cada experimento se comportan de la misma manera que el electrodo de referencia de grafito en una celda galvánica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

Se van a utilizar dos tipos de materiales para analizar la corrosión dinámica en los experimentos: jet impingement, cilindro rotativo y para la prueba de flujo interno; los cuales son: acero 1018 y el acero API 5LX65. El acero 1018, es comúnmente conocido como acero de transmisión, idóneo para procesos de fabricación como forja, soldadura, perforación, mecanizado, estirado en frío y tratamiento térmico. Es utilizado para crear piezas sometidas al desgaste; tiene buenas propiedades mecánicas, sus características de mecanizado son superiores, así como también cuentan con una alta medida de dureza Brinell (Azo Materials, 2012). A continuación, se muestran tablas de las distintas propiedades de este material.

Tabla 1. Composición química del acero 1018.

Element	Content
Carbon, C	0.14 - 0.20 %
Iron, Fe	98.81 - 99.26 % (as remainder)
Manganese, Mn	0.60 - 0.90 %
Phosphorous, P	≤ 0.040 %
Sulfur, S	≤ 0.050 %

Nota. Recuperado de "AISI 2018 Mild/Low Carbon Steel", de Azo Materials, (s.f).

Tabla 2. Propiedades físicas del acero 1018.

Physical Properties	Metric	Imperial
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in ³

Nota. Recuperado de "AISI 2018 Mild/Low Carbon Steel", de Azo Materials, (s.f).

Tabla 3. Propiedades eléctricas del acero 1018.

Electrical Properties	Metric	Comments
Electrical resistivity @0°C (32°F)	0.159 mΩ – mm	Annealed condition
@100°C/212°F	0.219 mΩ – mm	Annealed condition
@200°C/392°F	0.293 mΩ – mm	Annealed condition

Nota. Recuperado de "AISI 2018 Mild/Low Carbon Steel", de Azo Materials, (s.f).

El acero API 5LX65 es utilizado en las industrias del gas natural y petróleo para transportar agua, gas, o petróleo. Cuenta con estándares altos de tenacidad y con la capacidad de soportar altas presiones y temperaturas. Los dos dígitos colocados después de "X" indican la resistencia al rendimiento mínima (en ksi) (International Suppliers, s.f). Las distintas propiedades de este material se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4. Composición química del acero API 5LX65.

Grade	Chemical Composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti
API 5L X65	0.16	0.45	1.65	0.020	0.010	0.09	0.05	0.06

Nota. Recuperado de "5L X Grades", de International Suppliers, (s.f).

Tabla 5. Propiedades mecánicas del acero API5LX65.

Physical Properties	Metric
Density	7850 kg/m ³

Nota. Recuperado de "5L X Grades", de International Suppliers, (s.f).

2.2 Métodos

2.2.1 Banco de pruebas

La máquina que contiene los experimentos que se van a utilizar fue diseñada en un trabajo previo, por lo cual este apartado se centrará en los experimentos en los que se colocan las probetas, ya que dentro de los mismos sucede la corrosión dinámica. En la figura 6 se muestra un diagrama de flujo del mecanismo inicial, generado en el trabajo mencionado, el cual fue modificado con el objetivo de ahorrar espacio y conseguir una mayor maniobrabilidad, mientras que en la figura 7 se muestra el diseño inicial.

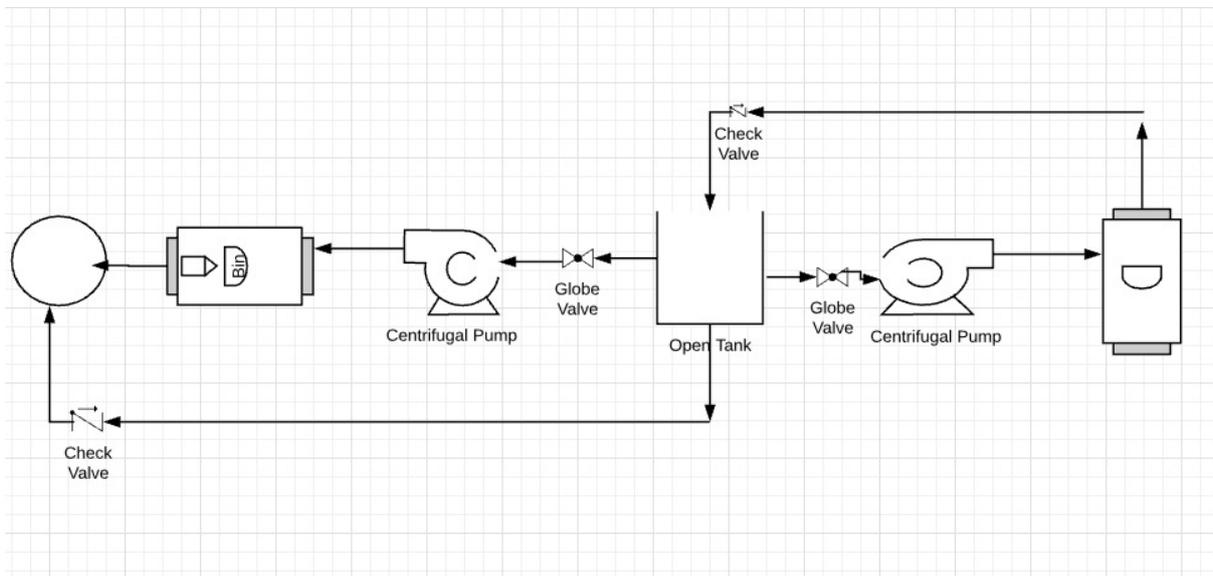


Figura 6. Diagrama de flujo del mecanismo inicial

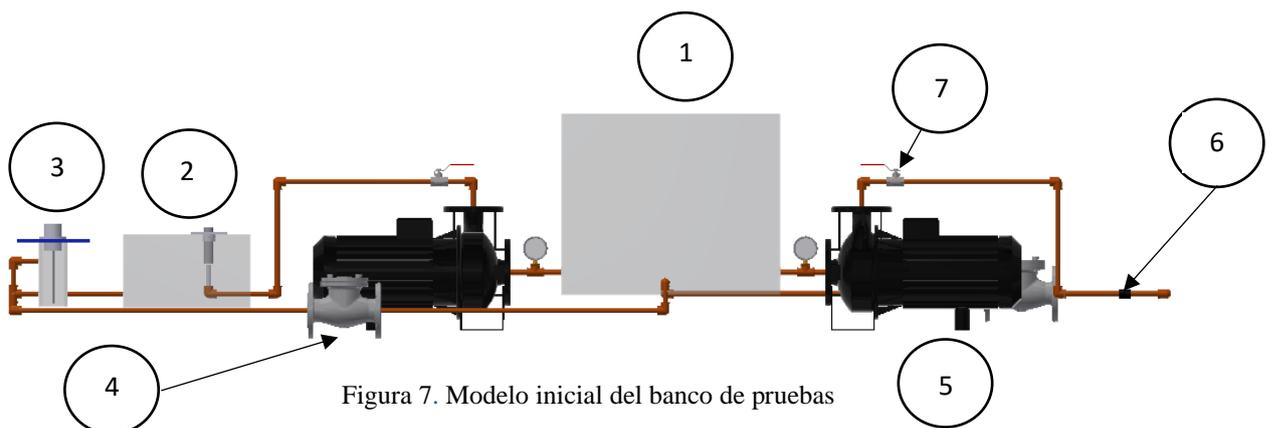


Figura 7. Modelo inicial del banco de pruebas

Tabla 6. Partes del banco de pruebas inicial

Enumeración	Dispositivo
1	Reservorio central
2	Jet impingement
3	Cilindro rotativo
4	Válvulas de globo
5	Bomba centrífuga
6	Flujo interno
7	Válvulas check

A continuación, se presentan las figuras 8, 9 y 10 del mecanismo nuevo, modificado en dos niveles distintos, permitiendo que las bombas y el reservorio se encuentren en la planta inferior, mientras que los experimentos en la superior. De manera que se tuvo que realizar el reensamblaje de toda la estructura para que el mecanismo pueda ser presentado de la manera mencionada.

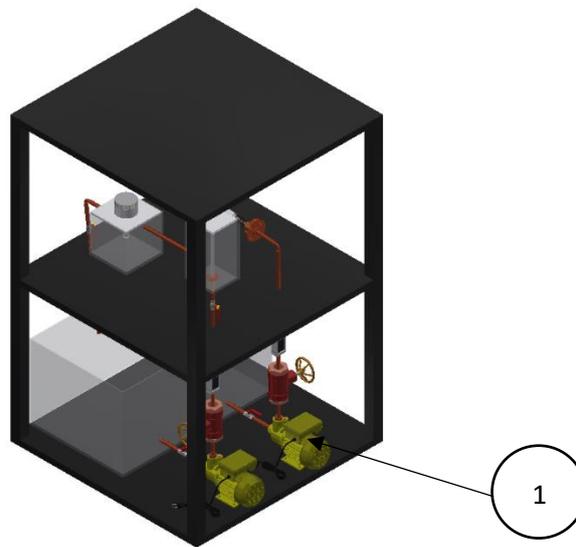


Figura 8. Modelo final del mecanismo

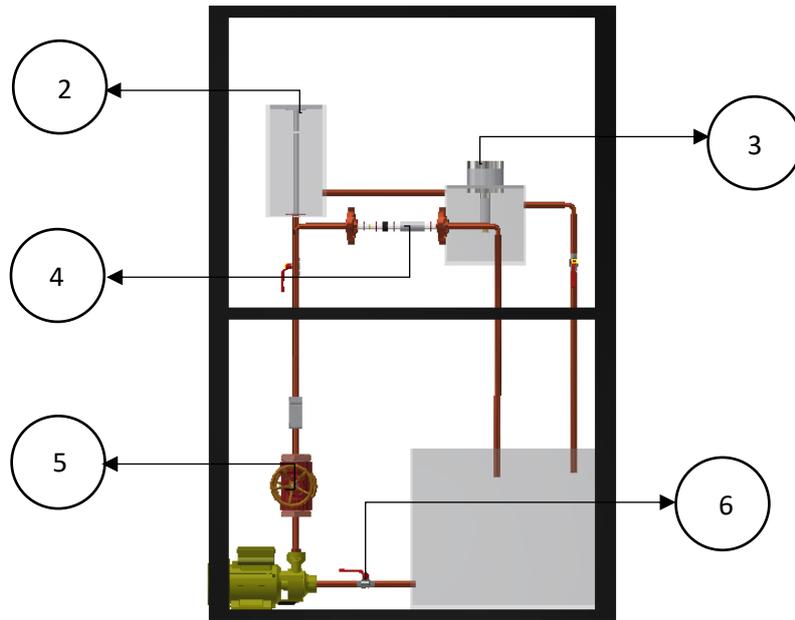


Figura 9. Vista lateral del modelo final

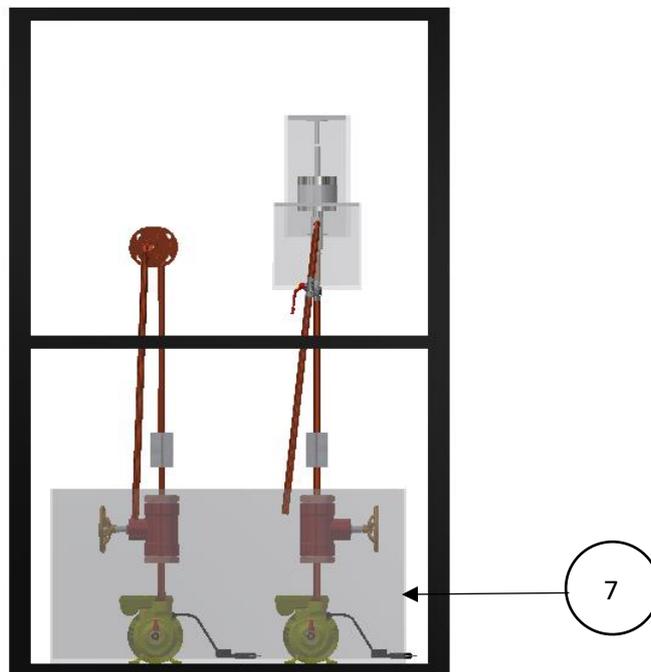


Figura 10. Vista lateral del modelo final

Tabla 7. Partes del banco de pruebas final

Enumeración	Dispositivo
1	Bombas centrífugas
2	Jet impingement
3	Cilindro rotativo
4	Flujo interno

5	Válvulas de globo
6	Válvulas check
7	Reservorio central

Se observa que la bomba del lado izquierdo de la figura 6 distribuye el fluido a los experimentos de jet impingement y cilindro rotativo, mientras que la bomba colocada en el lado inferior derecho del mecanismo distribuye el biocrudo a la prueba de flujo interno. Los experimentos situados en la parte izquierda tienen sus conexiones propias con la bomba mediante tuberías, y su retorno en conjunto con el reservorio; lo mismo sucede para la prueba de flujo interno, cuyo sistema es alimentado por la bomba y tiene su propio retorno con el reservorio, garantizando de esta manera que se obtenga un circuito cerrado, y constantemente se distribuya el fluido a los experimentos.

2.2.1.1. Prueba de Flujo Interno (FI)

La prueba de flujo interno contiene como parte integral de la tubería electrodos en formas de anillo, denominados electrodos de referencia, auxiliar y de trabajo. El electrodo de trabajo es un anillo maquinado de 25,4 mm de diámetro con un orificio en su interior de 12,7 mm y un espesor de 1 mm. El electrodo auxiliar es un eje de grafito de 12mm de largo, 25,4 mm de diámetro externo y 12,7 mm de diámetro interno, y finalmente se tiene el puente de sal de la celda de referencia que se conecta a la celda de referencia externa mediante un tubo de politetrafluoroetileno de 6,4 mm de diámetro; en el espacio entre cada uno de los anillos se colocan cauchos de 25,4 mm de diámetro externo y 12,7 mm de diámetro interno, denominándose espaciadores no metálicos, de manera que se realiza la unión fija entre cada uno de estos elementos, mediante la utilización de un eje central que se encargue de alinearlos y se obtenga una tubería formada por anillos, por la cual atraviesa el biocrudo, simulando la realidad de lo que ocurre en una tubería en la industria, y a su vez, esta prueba pueda ser utilizada para compararla con los experimentos jet impingement y cilindro rotativo.

La figura 2 muestra la colocación de cada anillo que conforma la tubería de flujo interno, y la figura 11 muestra el mecanismo de flujo interno diseñado en la que de igual manera se visualiza la posición de cada uno de los anillos y demás elementos.

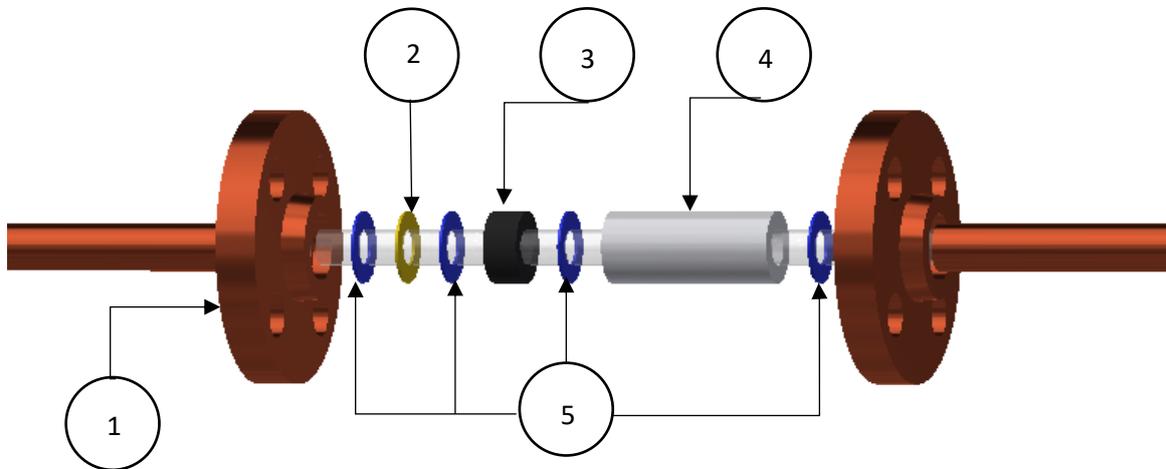


Figura 11. Mecanismo del flujo interno

Tabla 8. Partes del mecanismo del flujo interno

Enumeración	Dispositivo
1	Discos de sujeción
2	Working electrode
3	Auxiliary Electrode
4	Celda de referencia
5	Separador no metálico

2.2.1.2. Prueba de Jet Impingement (JI)

El experimento jet impingement cuenta dentro de su recipiente con un cilindro del material duralón de 12,5 mm de diámetro con un orificio maquinado en su centro de 2 mm y 200 mm de largo, que según Efird garantiza la estabilidad del flujo antes de que el fluido salga del cilindro. El electrodo auxiliar de grafito se fija en el extremo del cilindro y se le realiza un orificio de 2mm para que el fluido pueda salir e impactar con la superficie plana de la muestra de prueba conformada por dos electrodos de trabajo; las dimensiones para el primero son: 7 mm de diámetro exterior, 5mm de diámetro interior, con un espesor de 5 mm; las dimensiones del segundo son: 11 mm de diámetro exterior, 9 mm de diámetro interior y

5mm de espesor. Se tiene una distancia de 4mm para la distancia entre la superficie de prueba y el chorro. Con este experimento los electrodos de trabajo son expuestos a un chorro constante que atraviesa al cilindro denominado jet, y sale por el orificio que se encuentra en la superficie del grafito, de modo que la cara sometida al chorro sufrirá la corrosión dinámica a la que será expuesta. La figura 3 muestra la posición de cada electrodo que conforma el experimento de jet impingement, la figura 12 muestra el mecanismo de jet impingement diseñado y la figura 13 muestra las partes del mecanismo.



Figura 12. Mecanismo del Jet Impingement

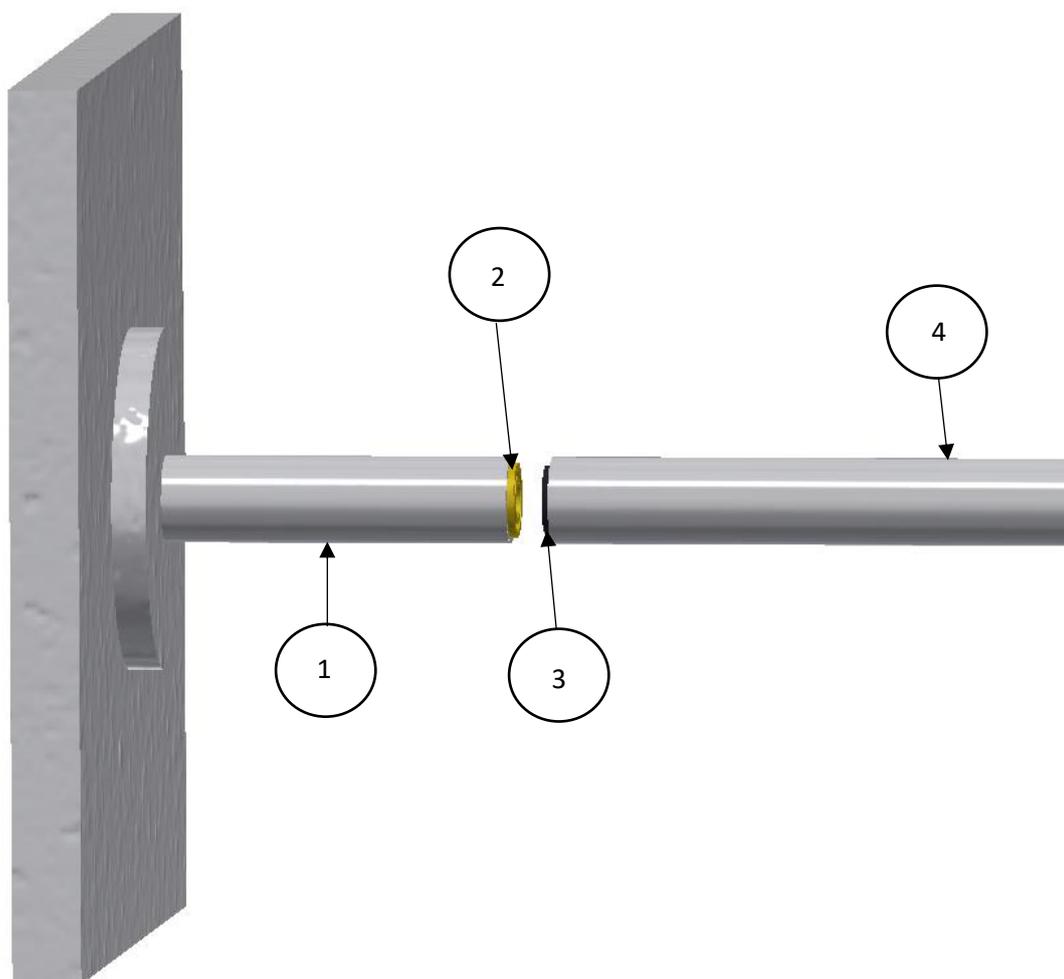


Figura 13. Componentes del jet impingement

Tabla 9. Partes del mecanismo del jet impingement

Enumeración	Dispositivo
1	Porta probetas
2	Working electrode
3	Auxiliary electrode
4	Jet

2.2.1.3. Prueba de Cilindro Rotativo (CR)

El experimento del cilindro rotativo cuenta con un recipiente y su tapa, de modo que en la tapa se realiza un mecanismo que sujete el motor, el cual gira a 7000 rpm al ser encendido por un interruptor, de manera que este se encuentra en la parte superior del recipiente. El electrodo de trabajo de 12,7 mm de diámetro exterior, 5mm de diámetro interior y 7,5 mm de espesor puede sujetarse en el extremo inferior del mecanismo, de modo

que la probeta tenga contacto directo con el fluido de trabajo y gire junto con el movimiento del motor dentro del fluido. La figura 4 muestra el mecanismo interno que conforma el experimento del cilindro rotativo, la figura 14 muestra el mecanismo del cilindro rotativo diseñado y la figura 15 muestra los componentes de este mecanismo.



Figura 14. Mecanismo del cilindro rotativo

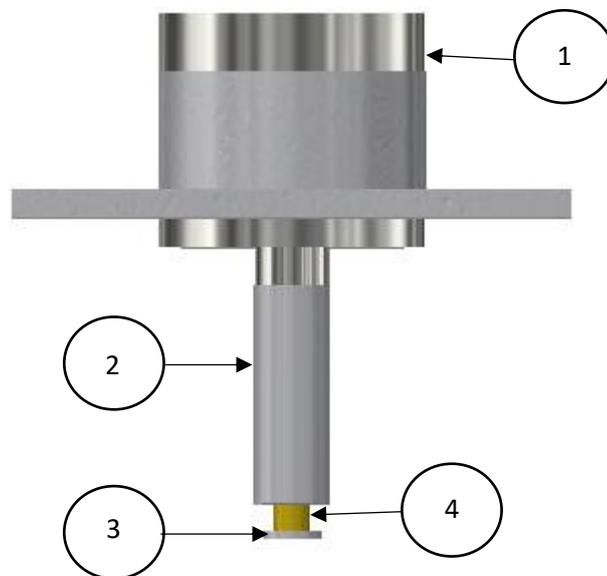


Figura 15. Componentes del cilindro rotativo

Tabla 10. Partes del mecanismo del cilindro rotativo

Enumeración	Dispositivo
1	Motor rotacional
2	Retenedor superior
3	Retenedor inferior
4	Working electrode

2.2.2 Comprobación del mecanismo

Previamente a realizar las pruebas de corrosión dinámica en los experimentos, se debe comprobar que no existan fugas entre los elementos del mecanismo, y comprobar la exactitud de los caudalímetros que contiene la máquina; para realizar este paso se debe esperar un tiempo alrededor de tres minutos, que es el tiempo que tarda el flujo en estabilizarse y colocar 40 L de biocrudo en el recipiente del reservorio, que es el volumen que necesita ser bombeado al circuito para que los experimentos funcionen; después de esto se mide el volumen en otro recipiente en un tiempo establecido, de este modo se puede verificar el caudal real en comparación al marcado por los caudalímetros, y poder trabajar con seguridad con estos dispositivos. Adicionalmente, las condiciones para que trabajen las bombas deben permanecer en una temperatura menor a 40 grados centígrados y con una temperatura del fluido de hasta 90 grados centígrados

2.2.3 Tasa de corrosión por pérdida de masa

La prueba de corrosión dinámica, ocasionada debido al flujo del biocrudo a lo largo del mecanismo consiste en el análisis de la pérdida de masa con los materiales acero 1018 y acero API 5LX65, de manera que se toma la medida del peso correspondiente para cada una de ellas utilizando un balanza de precisión, una vez realizado el proceso de pulido de cada probeta utilizando lijas de 240, 320, 400, 600, 1000, 1500 grits y paño con alúmina de 9 micras para posteriormente visualizar el estado de las probetas inicialmente en el microscopio y poder colocar las 4 probetas en el mecanismo; el número de probetas mencionado para el

funcionamiento del mecanismo se debe a que la prueba de flujo interno y el experimento de cilindro rotativo requieren de la colocación de una probeta en su interior, mientras que el experimento de jet impingement requiere el uso de dos probetas en su interior del mismo material. Una vez introducidas las probetas se procede a encender a todo el mecanismo, y apertura de las llaves de paso de este para que el fluido se transporte libremente y entre en contacto con cada una de las probetas. Una vez culminado el tiempo de exposición de 9 horas aproximadamente, se retiran las probetas de cada experimento y se procede a realizar la limpieza de estas al sumergirlas en etanol por un tiempo de 2 minutos, medición del nuevo peso de las probetas, de manera que se tenga la pérdida de masa utilizando la diferencia entre el peso inicial y el final. Para conocer a mayor profundidad el estado de las probetas se procede a analizarlas en el microscopio óptico. Este experimento se realiza 3 veces con 3 series de probetas diferentes del mismo material, ya que al terminar las pruebas con uno de los materiales se realiza el mismo proceso con el otro.

Es importante conocer la tasa de corrosión de las probetas de cada experimento de los dos tipos de materiales tras la exposición al fluido por un tiempo de 9 horas en la prueba de corrosión dinámica, de manera que se conozcan las milésimas de pulgada por año (MPY) que se corroen los materiales, y de esta manera también categorizar la corrosividad del fluido, mediante la tabla 11, así mismo conociendo que se trata de un fluido corrosivo debido a su pH bajo de 3,4 (Instituto de Investigación y en Materiales y Aplicaciones). De modo que para este cálculo se procede a utilizar la siguiente fórmula proporcionada por Schlumberger Oilfield Glossary:

$$MPY = \frac{22300 \times m_{p\acute{e}rdida}}{\rho \times A \times t}$$

Donde $m_{p\acute{e}rdida}$ es la masa que perdieron las probetas después de 9 horas de exposición al fluido medida en gramos, ρ es la densidad del material de la probeta que se

corrosión medida en $\frac{g}{cm^3}$, A es el área de la probeta que es expuesta al fluido medida en in^2 y t es el tiempo durante el cual fue expuesto a la corrosión medida en días.

Tabla 11. Caracterización de la tasa de corrosión de aceros al carbono.

Category	Average Corrosion Rate		Maximum Pitting Rate	
	mm/y	mpy	mm/y	mpy
Low	<0.025	<1.0	<0.13	<5.0
Moderate	0.025-0.12	1.0-4.9	0.13-0.20	5.0-7.9
High	0.13-0.25	5.0-10	0.21-0.38	8.0-15
Severe	>0.25	>10	>0.38	>15

Nota. Recuperado de NACE Standard RP-07-75. (2018).

2.2.4 Prueba de electrodo de referencia con respecto a las probetas de grafito

Para el análisis del comportamiento del electrodo de referencia con respecto a las probetas de grafito correspondiente a cada experimento se utiliza una celda galvánica compuesta de un recipiente, la cual se puede observar en la figura 16, conteniendo una mezcla de 600 mililitros de agua con 37,5 gramos de sal, en el que se introducen el electrodo de referencia de grafito o la probeta de grafito del experimento con la probeta de uno de los dos metales. Tanto las probetas de grafito como las del metal deben ser pulidas previo a su colocación; en el caso de las probetas de grafito se utilizan en un paño suspensiones de diamante de 9 micras y 1 micra; para el caso de las probetas del metal se realiza el proceso de pulido como en la prueba de corrosión dinámica; se toman los datos con un multímetro, siendo el polo positivo la probeta de acero, mientras que el negativo el electrodo de referencia de grafito o la probeta de grafito. Este proceso se realiza por 30 minutos, tomando mediciones cada 3 minutos con cada tipo de material. En la sección de resultados se grafican las curvas de comportamiento de potencial en función del tiempo para analizar estadísticamente la similitud entre la probeta de grafito y electrodo de referencia de grafito.



Figura 16. Celda Galvánica con agua salina

2.2.5 Tasa de corrosión por potencial por medio de potencióstato

En el caso de la utilización de un potencióstato para el estudio de la corrosión dinámica se colocan las probetas de la misma manera que en la primera prueba en la máquina, bajo las mismas condiciones de operación de la máquina, volumen requerido, y número de ensayos, pero en este caso se emplea un potencióstato, el cual es un dispositivo electrónico que controla una celda conformada por tres electrodos que contienen cada uno de los experimentos, los cuales se encuentran en contacto con el biocrudo, que funcionan bajo el principio de que se mantiene de forma constante el potencial del electrodo de trabajo con respecto al de referencia del que se toma como punto de referencia su voltaje, así mismo se utiliza al electrodo auxiliar para ajustar la corriente necesaria para que exista esta relación; los electrodos mediante alambres de cobre se unen por conexiones del dispositivo al potencióstato para poder cumplir con el circuito eléctrico (La Guía, s.f). Con el electrodo de referencia se puede conocer el valor del potencial del electrodo de trabajo al no circular

corriente a través de él, de manera que la caída de ohmios es nula entre estos dos electrodos. El potenciostato se encarga de estabilizar de manera automática la diferencia de potencial entre el electrodo de trabajo y el de referencia, de manera que la diferencia de potencial entre el de trabajo y el auxiliar es impuesta. Según Mendoza (s.f), al aplicar una pequeña señal de potencial a un electrodo y medir las respuestas en potencial del sistema, con ayuda del potenciostato se procesan mediciones de potencial- tiempo y corriente- tiempo, de modo que se obtengan una serie de valores de impedancia correspondientes a cada frecuencia. De manera que según Efird (s.f), se puedan realizar las mediciones de impedancia electroquímica utilizando el potenciostato con su analizador de respuesta de frecuencia de 104 Hz a 5×10^{-2} Hz, con una amplitud de señal sinusoidal de 5 mV, los cuales se controlan por medio de una computadora (Denpo, s.f) y de esta manera se pueda determinar la densidad de corriente en miliamperios por centímetro cuadrado en función del potencial, medido en voltios.

2.2.6 Limpieza del mecanismo

Al finalizar cada prueba de corrosión dinámica y en cada cambio de material a introducir en los experimentos, se debe realizar la limpieza de las bombas, las cuales son los componentes más críticos de la máquina, al ser los elementos más costosos y de funcionalidad imperativa para el trabajo continuo del dispositivo; para dicha limpieza se debe separar cada bomba de la máquina e introducir aproximadamente 1 L de acetona en las mismas. Finalmente, se deberá bombear acetona por todo el circuito para limpiarlo de todo tipo de impurezas ocasionadas por el flujo del biocrudo a lo largo del dispositivo, ya que no se requiere que sufra del fenómeno de la corrosión para que pueda seguir siendo utilizado sin reemplazar componentes, como tuberías, y válvulas; para realizar este procedimiento es necesario introducir mínimo 20 L en el reservorio para que el fluido atraviese todas las tuberías, accesorios y recipientes de los experimentos. Para explicar de manera más amplia el funcionamiento, y limpieza de la máquina, se detallan estos procesos en el Anexo C.

3. RESULTADOS

3.1. Mediciones de tasa de corrosión por pérdida de masa

A continuación, se presenta en la tabla 12 la pérdida de masa en miligramos correspondiente al acero 1018 y al API 5LX65 en cada serie y experimento.

Tabla 12. Resultados de masa de las probetas de cada experimento de los materiales acero 1018 y al API 5LX65

SERIE	EXPERIMENTO	1018 (g)	1018 corroido (g)	API (g)	API corroido(g)
1	FLUJO INTERNO	2.7727	2.7719	2.9501	2.9496
	CILINDRO ROTATIVO	5.2076	5.2059	4.8652	4.8641
	JET INTERNO	0.6655	0.6653	0.8446	0.8445
	JET EXTERNO	1.0985	1.0975	1.0761	1.0755
2	FLUJO INTERNO	2.5955	2.5951	2.5593	2.559
	CILINDRO ROTATIVO	4.9699	4.9690	4.7400	4.7395
	JET INTERNO	0.6111	0.6108	0.6695	0.6693
	JET EXTERNO	1.0391	1.0386	1.0893	1.0892
3	FLUJO INTERNO	2.6799	2.6794	2.6794	2.6790
	CILINDRO ROTATIVO	4.7888	4.7877	4.9795	4.9790
	JET INTERNO	0.6901	0.6897	0.6218	0.6215
	JET EXTERNO	1.0918	1.0912	1.0200	1.0197

A continuación, se presenta en la tabla 13, de pérdida de masa en miligramos correspondiente al acero 1018 y al API 5LX65 en cada serie y experimento.

Tabla 13. Pérdidas de masa de las probetas de materiales acero 1018 y API 5LXG5

EXPERIMENTO	SERIE	Pérdida 1018 (mg)	Pérdida API (mg)
FLUJO INTERNO	1	0.8	0.5
	2	0.4	0.3
	3	0.5	0.4
CILINDRO ROTATIVO	1	1.7	1.1
	2	0.9	0.5
	3	1.1	0.5
JET INTERNO	1	0.2	0.1
	2	0.3	0.2
	3	0.4	0.3
JET EXTERNO	1	1	0.6
	2	0.5	0.1
	3	0.6	0.3

Como resultado de las tablas anteriores, se puede observar que las pérdidas de masa en el acero 1018 son mayores que en el API 5LX65 para cada uno de los experimentos en todas las series. Para una mejor apreciación de los resultados de la tabla 13 se realizan los cálculos de la tasa de corrosión de las probetas en milésimas de pulgada por año (MPY) para

cada experimento, los cuales se puede apreciar en la tabla 14, así como también en las figuras 17 y 18, se observa un diagrama de caja y bigotes de los resultados de la tabla 14, en donde se agrupan los datos de todas las series para cada experimento.

Tabla 14. Milésimas de pulgada por año de las probetas de materiales acero 1018 y API 5LXG5

EXPERIMENTO	SERIE	MPY 1018	MPY API
FLUJO INTERNO	1	97.751	61.250
	2	48.875	36.750
	3	61.094	49.000
CILINDRO ROTATIVO	1	27.696	17.967
	2	14.663	8.167
	3	17.921	8.167
JET INTERNO	1	51.719	25.925
	2	77.578	51.851
	3	103.438	77.776
JET EXTERNO	1	155.188	93.350
	2	77.594	15.558
	3	93.113	46.675

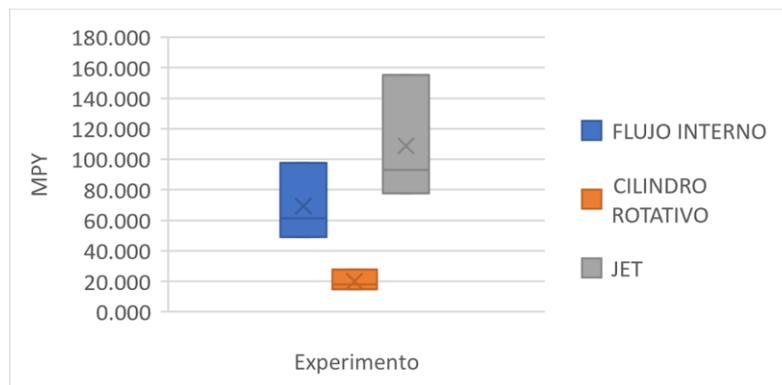


Figura 17. MPY de experimentos para acero 1018

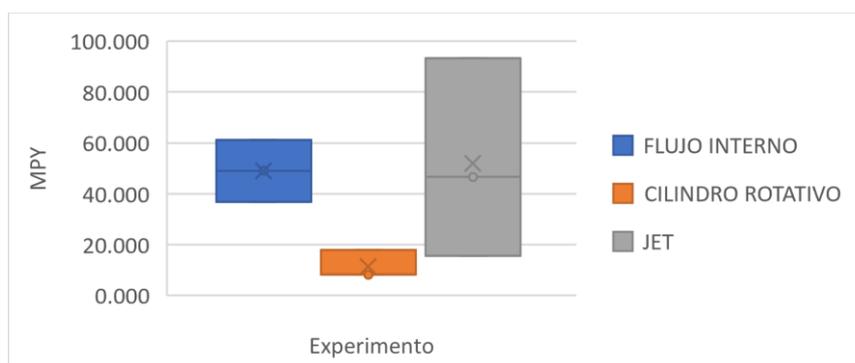
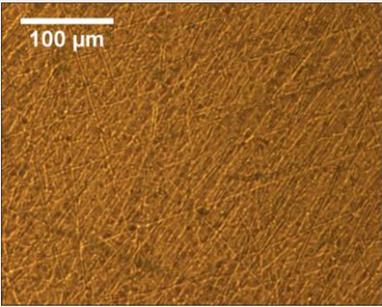
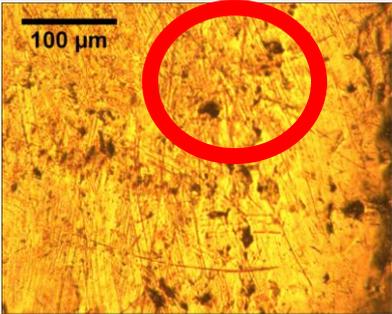
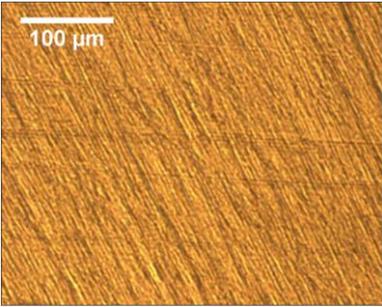
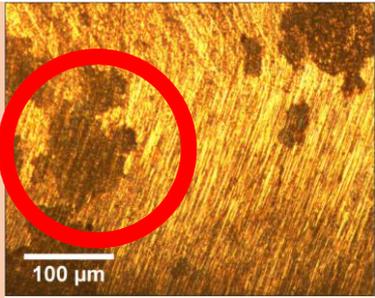
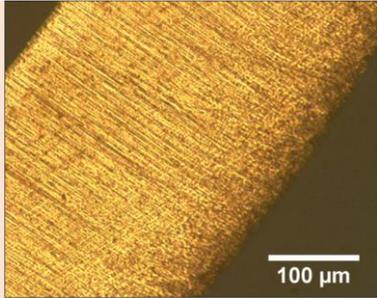
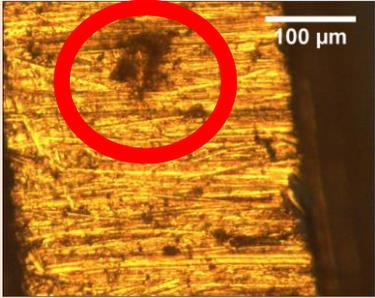


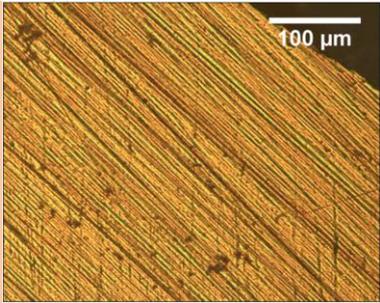
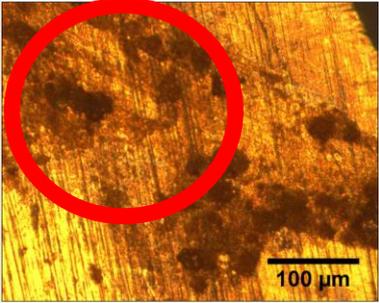
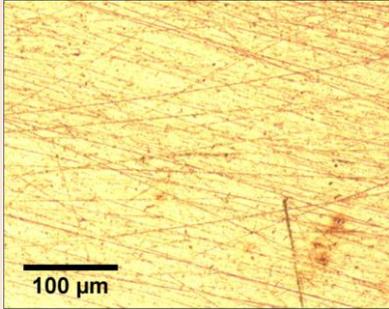
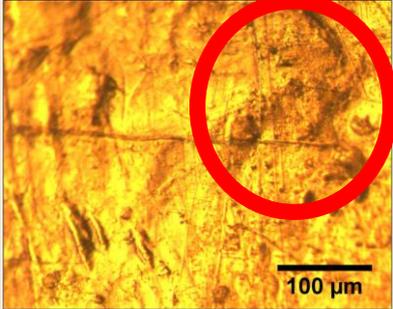
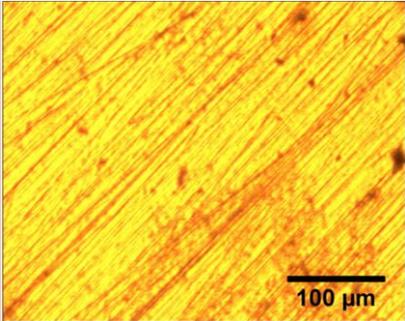
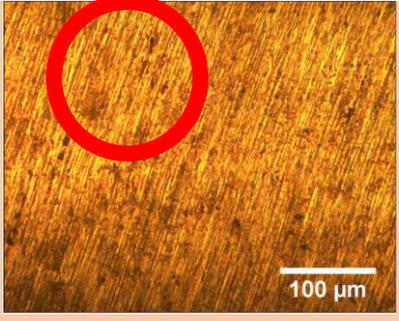
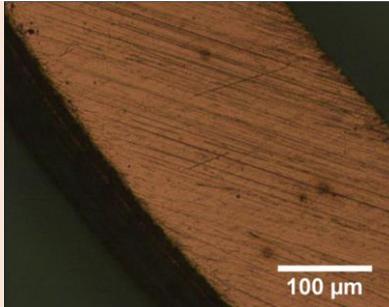
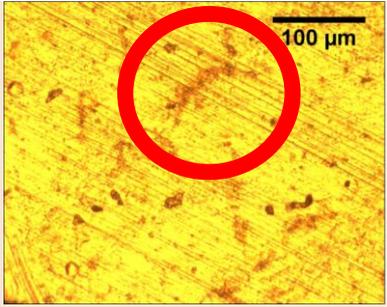
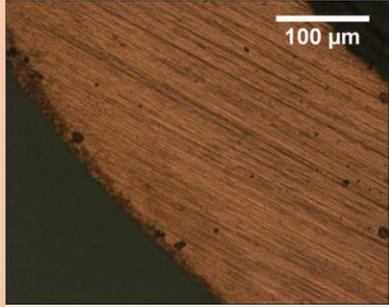
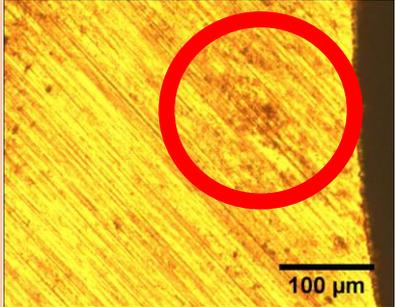
Figura 18. MPY de experimentos para acero API 5LX65

3.2 Análisis metalográfico

En la tabla 15 se adjuntan las imágenes obtenidas por medio del microscopio óptico en una escala 100x, de la serie intermedia, es decir de la segunda serie del acero 1018 y del API 5LX65 de las probetas correspondientes a todos los experimentos antes de ser sometidas a la corrosión y después de la misma.

Tabla 15. Resultados del microscopio óptico de los experimentos a magnificación 100X

Acero 1018		
	Previo a la corrosión	Corroído
Flujo interno		
Cilindro rotativo		
Jet externo		

		Acero API 5LX65	
		Previo a la corrosión	Corroído
Jet interno			
Flujo interno			
Cilindro rotativo			
Jet externo			
Jet interno			

Se puede observar en las imágenes que el acero 1018 presenta una corrosión generalizada, es decir que se distribuye de una manera uniforme en las superficies de las probetas, mientras que el API 5LX65 tras las nueve horas de exposición de las probetas al fluido presenta corrosión localizada (pitting) (Tecnología de Procesos Industriales). El resto de las imágenes correspondientes a los demás experimentos y series se encuentran adjuntos en anexos.

3.3 Prueba de medición de potencial del electrodo de referencia con respecto a las probetas de grafito

A continuación, se presentan en la tabla 16, los resultados obtenidos de potencial en función del tiempo tras la exposición de la probeta de grafito de cada experimento y del electrodo de referencia de grafito, así como también se muestran las figuras 19, 20, 21 para apreciar de manera visual los datos obtenidos y comparar el comportamiento del electrodo de referencia y probetas de grafito de cada experimento. En el eje de las X se visualiza el tiempo (medido en minutos) en el que se encuentran sumergidas las probetas metálicas y las de grafito en el agua salina y en el eje Y el potencial medido del grafito (electrodo de referencia y probeta) en milivoltios.

Tabla 16. Datos obtenidos durante la exposición de 30 minutos del acero 1018 en agua salina de los experimentos

ACERO AISI 1018						
Tiempo (min)	Jet 1018 Electrodo de referencia (mV)	Jet 1018 Probeta de grafito (mV)	Rotativo 1018 Electrodo de referencia (mV)	Rotativo 1018 Probeta de grafito (mV)	Flujo interno 1018 Electrodo de referencia (mV)	Flujo interno 1018 Probeta de grafito (mV)
3	-280	-220	-260	-573	-270	-208
6	-277	-211	-265	-592	-274	-207
9	-274	-216	-269	-601	-277	-202
12	-266	-213	-273	-606	-280	-198
15	-267	-212	-277	-611	-283	-194
18	-270	-210	-279	-613	-285	-181
21	-272	-207	-280	-616	-286	-176
24	-273	-204	-281	-618	-287	-167
27	-274	-201	-282	-620	-288	-158
30	-273	-199	-282	-621	-289	-150

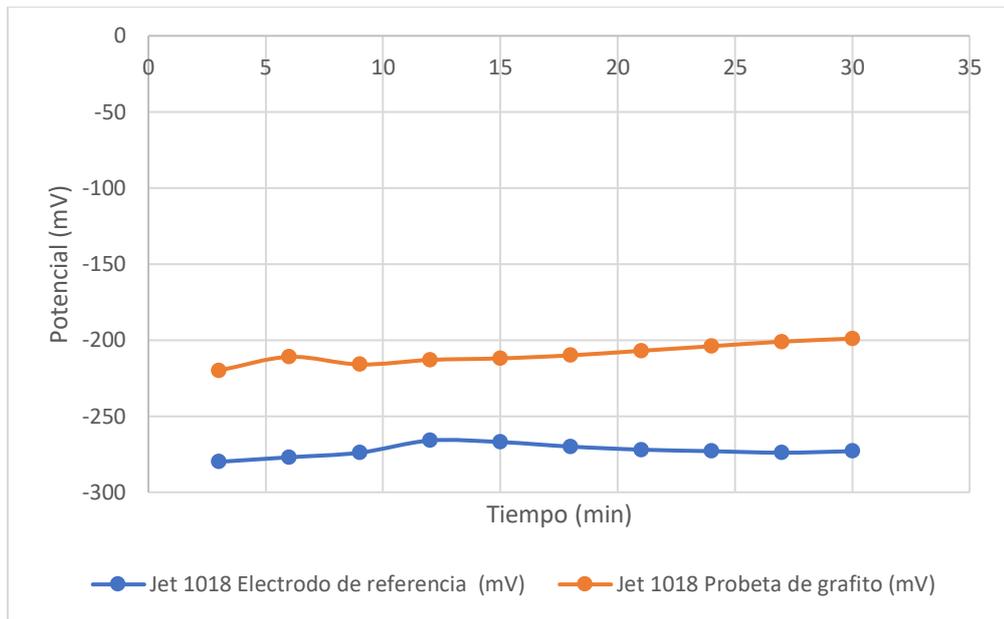


Figura 19. Potencial Jet Impingement 1018 vs tiempo

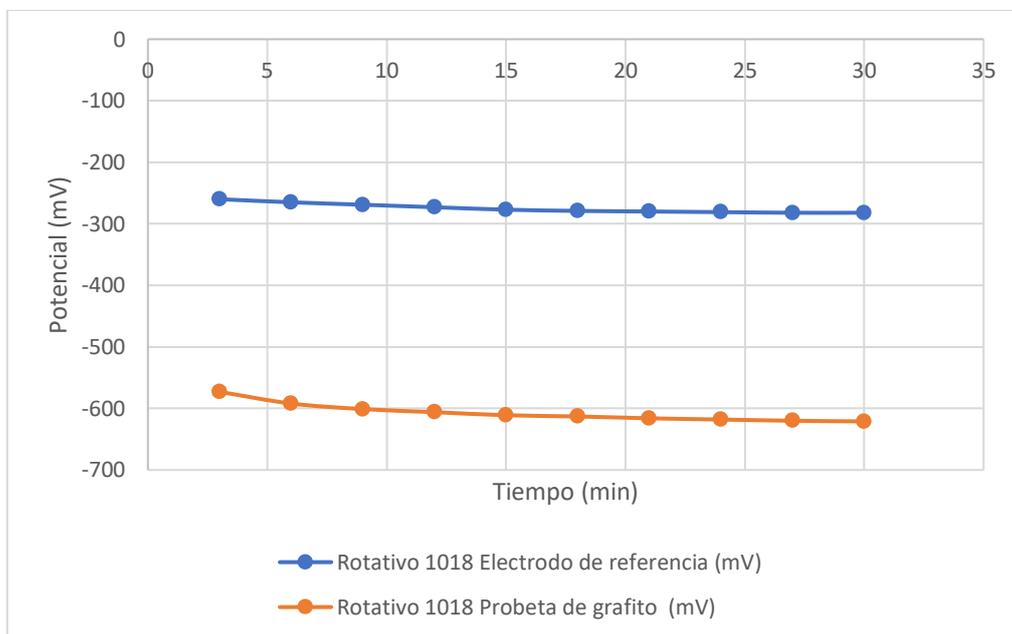


Figura 20. Potencial cilindro rotativo 1018 vs tiempo

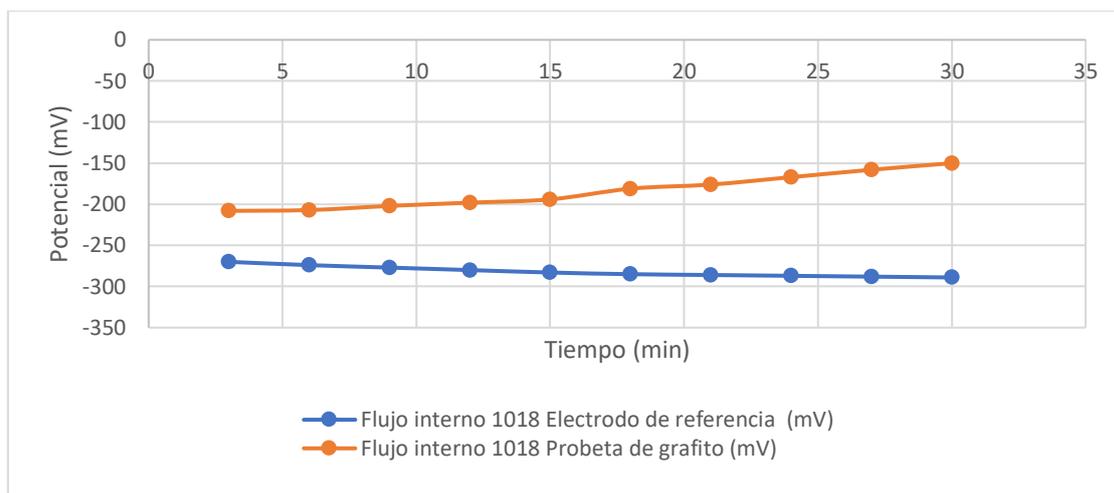


Figura 21. Potencial flujo interno 1018 vs tiempo

Adicionalmente, se presentan en la tabla 17 los datos obtenidos tras la exposición de 30 minutos en agua salina de las probetas de cada experimento conectadas al multímetro, y este a su vez al electrodo de referencia de grafito y probeta de grafito para el acero API 5LX65. Además, se presentan las figuras 22, 23, 24 para apreciar de manera visual los datos obtenidos y comparar el comportamiento del electrodo de referencia y probetas de grafito de cada experimento. En el eje de las X se visualiza el tiempo (medido en minutos) en el que se encuentran sumergidas las probetas metálicas y las de grafito en el agua salina y en el eje Y el potencial medido del grafito (electrodo de referencia y probeta) en milivoltios.

Tabla 17. Datos obtenidos durante la exposición de 30 minutos del acero API 5LX65 en agua salina de los experimentos

ACERO API 5LX65						
Tiempo (min)	Jet API Electrodo de referencia (mV)	Jet API Probeta de grafito (mV)	Rotativo API Electrodo de referencia (mV)	Rotativo API Probeta de grafito (mV)	Flujo interno API Electrodo de referencia (mV)	Flujo interno API Probeta de grafito (mV)
3	-101	-107	-356	-205	-261	-258
6	-91	-102	-344	-202	-268	-256
9	-91	-91	-321	-198	-278	-253
12	-90	-81	-315	-189	-285	-249
15	-87	-75	-312	-178	-291	-244
18	-86	-74	-311	-166	-295	-239
21	-85	-74	-311	-156	-298	-236
24	-98	-73	-312	-147	-301	-230
27	-102	-75	-313	-139	-303	-224
30	-104	-74	-314	-133	-304	-218

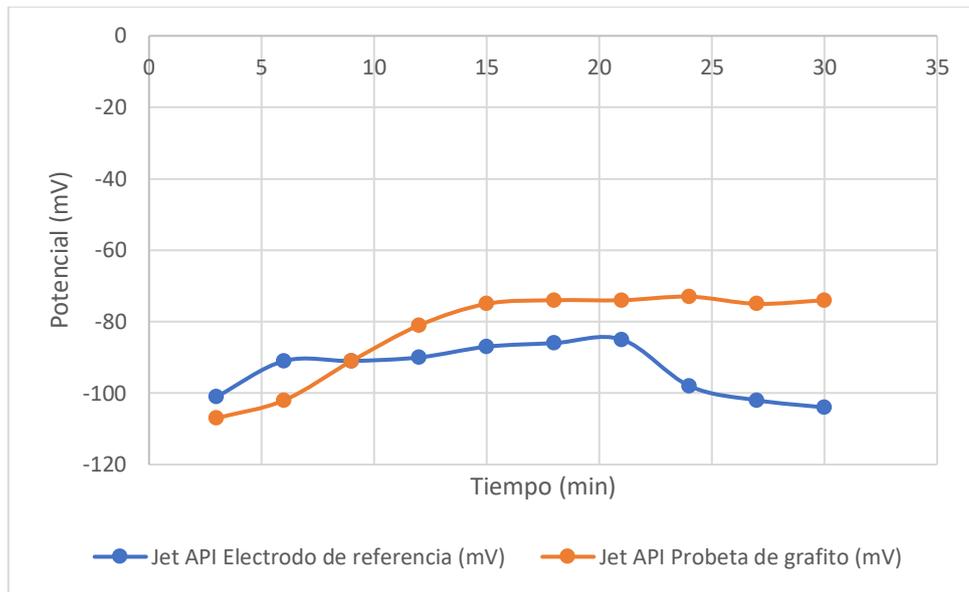


Figura 22. Potencial Jet Impingement API vs tiempo

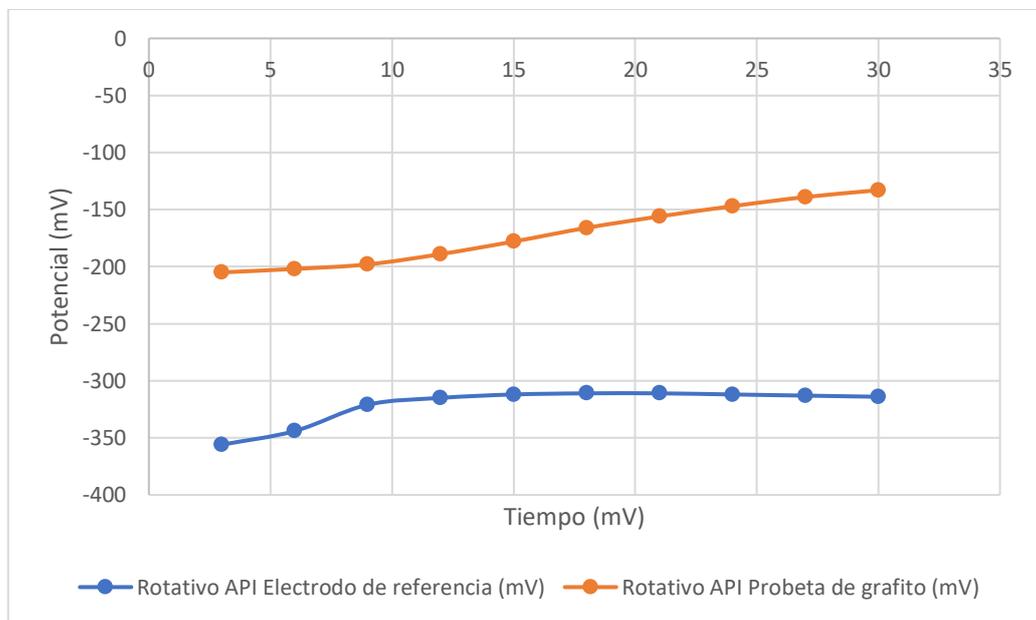


Figura 23. Potencial cilindro rotativo API vs tiempo

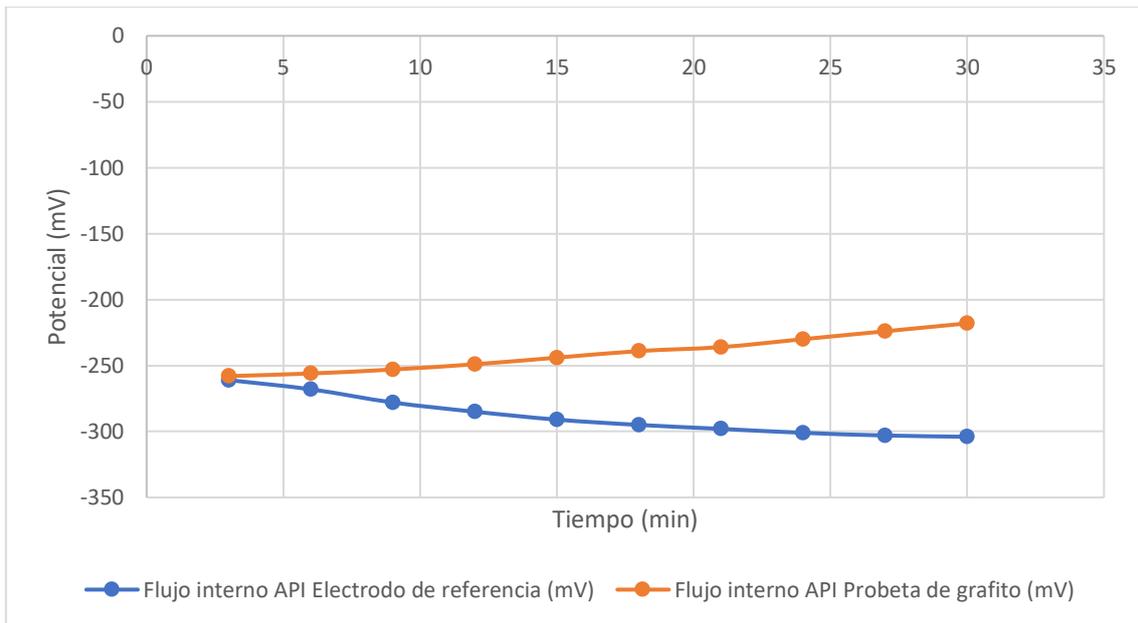


Figura 24. Potencial flujo interno API vs tiempo

A continuación, se presentan las figuras del ensayo realizado sin un pulido adecuado utilizando la celda galvánica

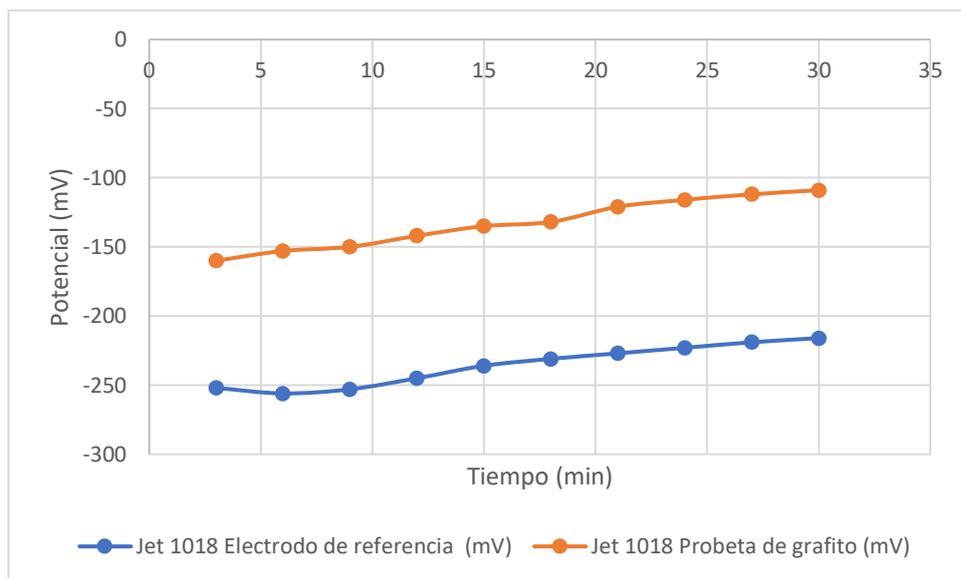


Figura 25. Potencial jet impingement 1018 vs tiempo (sin pulido correcto)

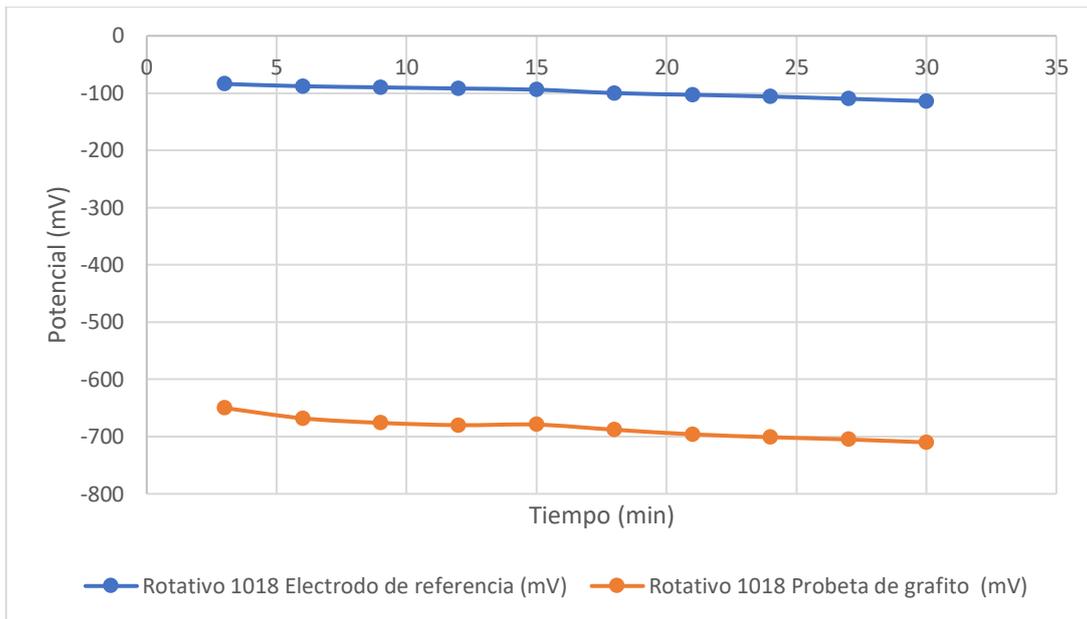


Figura 26. Potencial cilindro rotativo 1018 vs tiempo (sin pulido correcto)

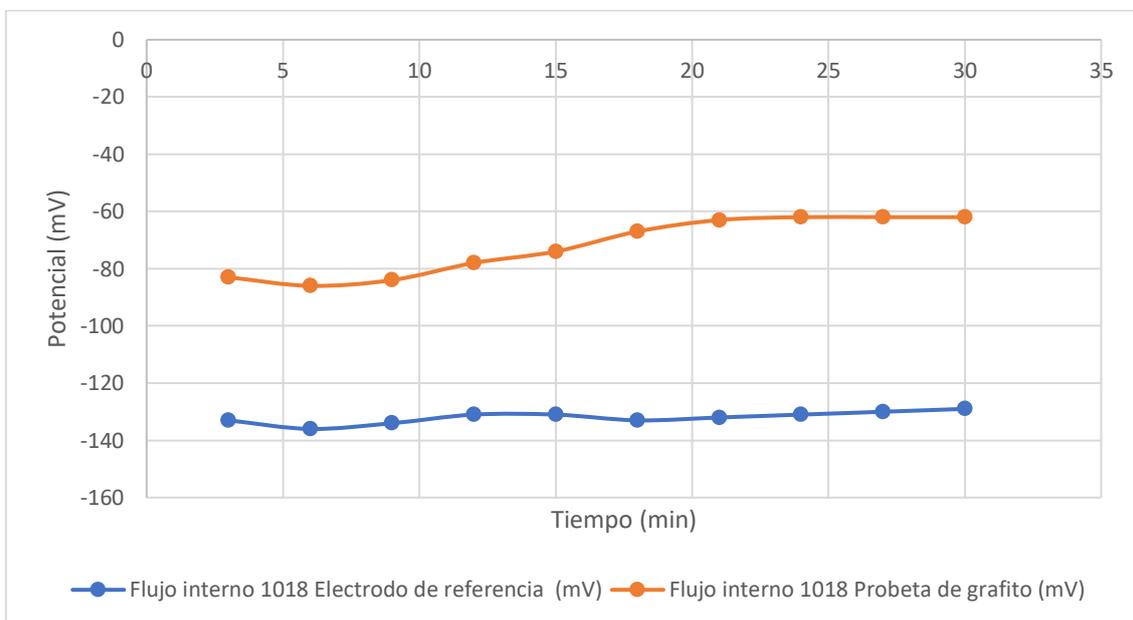


Figura 27. Potencial flujo interno 1018 vs tiempo (sin pulido correcto)

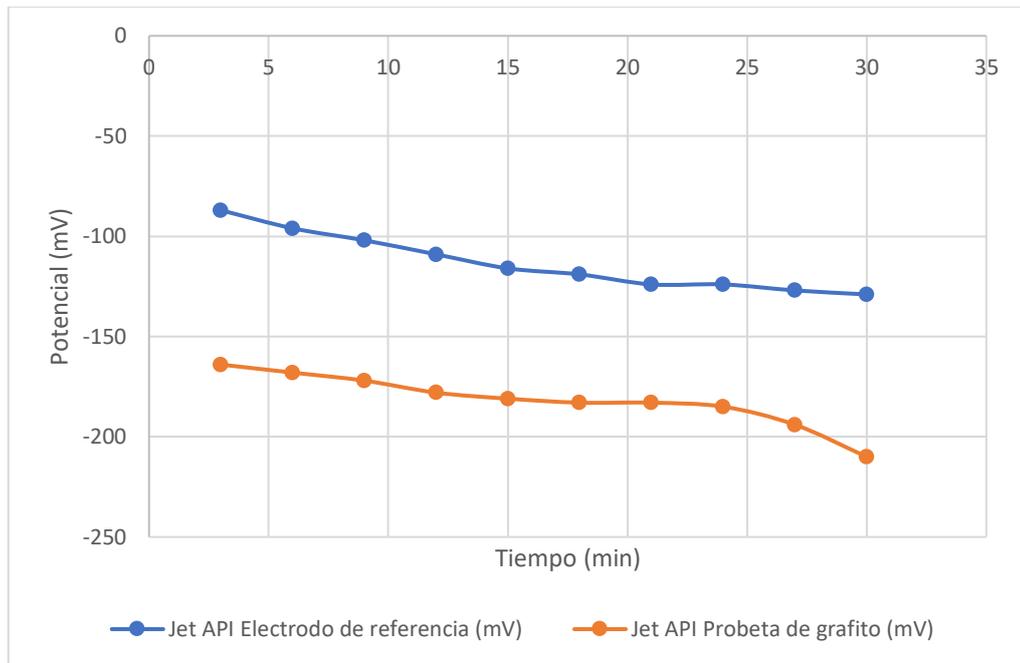


Figura 28. Potencial jet impingement API vs tiempo (sin pulido correcto)

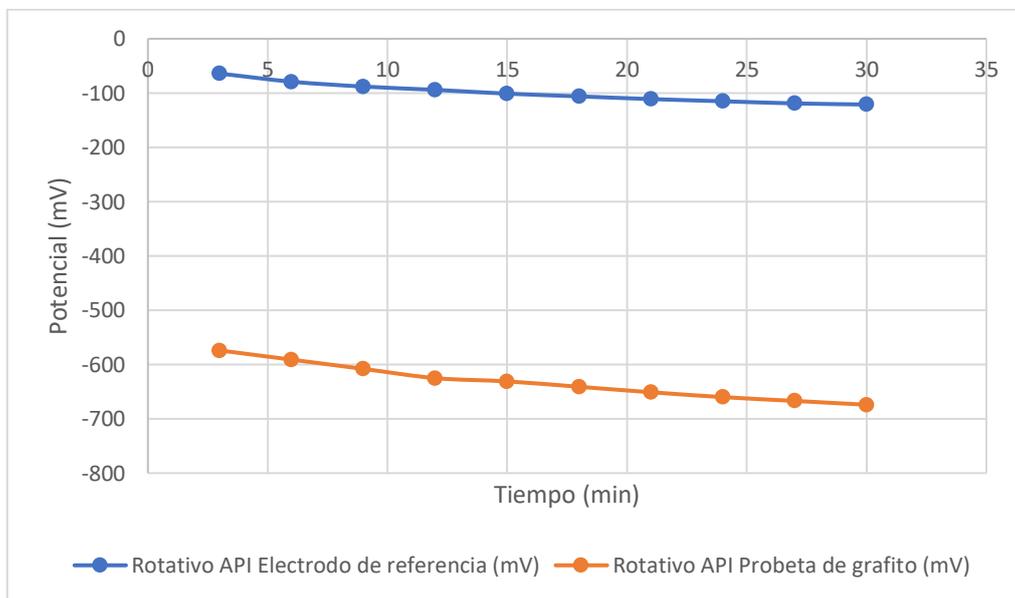


Figura 29. Potencial cilindro rotativo API vs tiempo (sin pulido correcto)

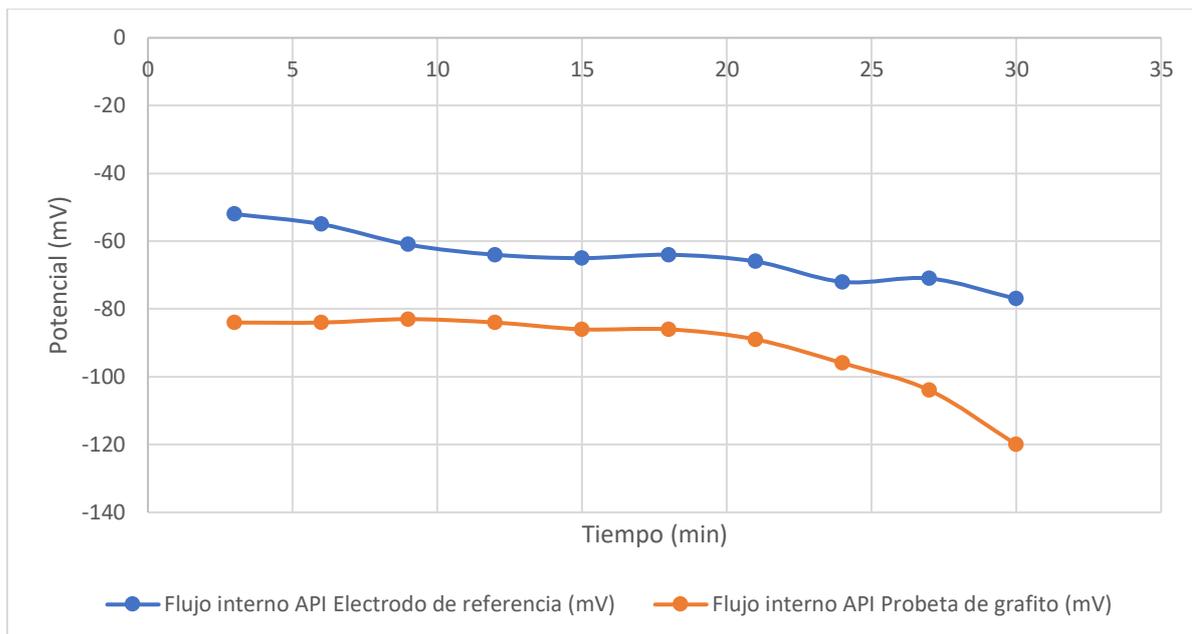


Figura 30. Potencial flujo interno API vs tiempo (sin pulido correcto)

4 DISCUSIÓN

El fluido con el que se ha trabajado a lo largo de este trabajo (biocrudo) en la prueba de corrosión dinámica, ha resultado ser muy corrosivo (NACE Standard RP-07-75), esto debido a su composición química, y su nivel de pH de 3,4 (Keiser,2012), además según la tabla 11, la categoría de corrosión del fluido es severo, de manera que para un acero común como el 1018, este fluido iba a ocasionar una corrosión más notoria en el mismo en comparación a la del acero API 5LX65 al ser sometido al fluido, principalmente porque este último es un material usado en aplicaciones de transporte de petróleo (Aleación tubos, s.f), de manera que iba a ser más resistente a la corrosión.

Para la prueba de corrosión dinámica, en algunos casos las pérdidas de masa y la tasa de corrosión de cada tipo de probeta según el experimento varían, esto pudo ocurrir debido a las condiciones ambientales en las que se utilizó la máquina (Yarelys, 2007), ya que se trabajó en periodos de lluvia o de calor intenso, de manera que el fluido tendía a calentarse

cuando el clima presentaba una temperatura elevada, de modo que las bombas debían hacer un mayor esfuerzo para distribuir el fluido caliente a lo largo del mecanismo. La tasa de corrosión en milésimas de pulgada por año en el experimento del cilindro rotativo es menor, ya que posiblemente a largo plazo soporte más la corrosión, a pesar de que las pérdidas de masa son mayores, debido a que presenta una mayor área expuesta al fluido.

Para el caso de la prueba de la celda galvánica, la geometría, el volumen de las probetas de grafito, el posible contacto entre las probetas y las paredes del recipiente (Bottani, 2006), pudieron haber sido los causantes para que las curvas de potencial en función del tiempo tengan variaciones y no se asemejen exactamente a la del electrodo de referencia de grafito para cada uno de los experimentos, sin embargo, para cada caso las curvas son similares. Sobre todo, se pudo comprobar con la comparación de los dos ensayos realizados de los experimentos con celda galvánica, que el pulido previo de las piezas a introducir tanto de los dos tipos de aceros y de las probetas de grafito, tiene un impacto significativo en los resultados de las curvas, de modo que aplicando el proceso de pulido descrito en la sección de métodos, en el que se mencionan todas las lijas, paños y lúmina que se debe utilizar en el caso de las probetas de metal para obtener un pulido tipo espejo, así como también el proceso con paño y las suspensiones de diamante de 1 y 9 micras para el correcto pulido de las probetas de grafito, da como resultado que la superficie de todos los elementos se visualicen sin imperfecciones, y de esta forma reducir las diferencias entre cada curva respecto al potencial.

5 CONCLUSIONES

- La máquina utilizada simula correctamente cada uno de los experimentos que se diseñaron previamente, después de haber culminado con su ensamblaje, de modo que logran trabajar de manera continua, libre de fugas y en simultáneo tanto las bombas

que tienen la capacidad de distribuir el fluido correctamente hacia los experimentos y tuberías, así como también los experimentos por varias horas, en el caso de este trabajo, por 9 horas seguidas.

- En el caso de la prueba dinámica realizada, la tasa de corrosión ocasionada por la prueba de jet impingement se asemeja más a la corrosión obtenida por la prueba de flujo interno, y que la prueba del cilindro rotativo presenta una menor tasa de corrosión en milésimas de pulgada por año y una mayor pérdida de masa tras 9 horas de exposición al biocrudo.
- Para evaluar la tasa de corrosión dinámica, adicionalmente, se ha realizado un diagrama de caja y bigote en el que se aprecia que los datos de la tasa de corrosión en milésimas de pulgada por año tienen una menor variación en la prueba de cilindro rotativo se todas sus series en conjunto y una mayor variación en la prueba de las series de jet impingement, de manera que el experimento que mejor repetitividad tiene es el del cilindro rotativo.
- Las imágenes obtenidas del microscopio para la prueba metalográfica, el cual fue la herramienta de laboratorio utilizada, aseveran que el acero 1018 presenta mayores imperfecciones visibles, debido a la corrosión uniforme que presentan las probetas, mientras que la corrosión que se observa en el acero API 5LX65, no se aprecia la corrosión general, pero se observa la presencia de pitting , ya que se presentan defectos en la superficie del metal y a medida que se desarrollan, tienden a unirse y ampliarse, aumentando su tamaño, de modo que se crean grandes pérdidas de espesor de una manera localizada, que pueden ocasionar roturas frágiles, debido al desarrollo de grietas.
- Se puede afirmar que las probetas de grafito en comparación al electrodo de referencia de grafito tienden a tener comportamientos similares tras la exposición de

30 minutos en la celda galvánica compuesta de agua salina, tomando mediciones cada 3 minutos mediante el multímetro, siendo las curvas de potencial del electrodo de referencia y de la probeta de grafito que más semejanzas presentan en función del tiempo sucede en los experimentos de jet impingement y flujo interno.

- El uso del potencióstato para la prueba de potencial no se pudo llevar a cabo, debido a que no hubo disponibilidad de este en el periodo propuesto para realizar este trabajo.

6 REFERENCIAS

- Aleación Tubos. (s.f). Línea de tuberías Api 5L. Recuperado el 5 de diciembre del 2019 desde <https://www.tubos-acero-aleacion.com/linea-de-tuberias-api-5l.html>
- Arrieta, A., Tarazona, R. (2014). Sistema multipotenciostato basado en instrumentación virtual. Recuperado el 4 de diciembre del 2019 desde http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432014000300001
- Ávila, J., Genescá, J. (s.f). Más allá de la herrumbre. Recuperado el 4 de diciembre del 2019 desde http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/09/htm/sec_9.html
- Azo Materials. (2012). AISI 2018 Mild/Low Carbon Steel. Recuperado el 25 de octubre del 2019 desde <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6115>
- Bottani, E., Odetti, H., Pliego, O., et al. (2006). Química General. Universidad Nacional del Litoral.
- Cathodic Protection Solutions. (s.f). Excalibur Shield Introduction. Recuperado el 5 de diciembre del 2019 desde <https://www.cathodic-protection-solutions.com/internal-pipeline-corrosion-control/>
- Denpo, K. y Ogawa H, Fluid Flow Effects on CO₂ Corrosion Resistance of Oil Well Materials.
- Efird, K., Wright, E., Boros, J., et al. (1993). Correlation of Steel Corrosion in Pipe Flow with Jet Impingement and Rotating Cylinder Tests. *NACE International*
- Gestores de Residuos. (2017). Combustible a partir de neumáticos fuera de uso. Recuperado el 23 de noviembre del 2017 desde

<https://gestoresderesiduos.org/noticias/combustible-a-partir-de-neumaticos-fuera-de-uso>

International Suppliers. (s.f). API 5L X Grades. Recuperado el 25 de octubre del 2019 desde <https://www.api5lx.com/api5lx-grades/>

Instituto de Investigación en Materiales y Aplicaciones. (s.f). Estudio de corrosión por biocrudo. Universidad San Francisco de Quito: Quito

Keiser, J. (2012). Corrosion Studies of Raw and Treated Biomass-Derived Pyrolysis Oils. NACE International.

La Guía. (s.f). Potenciostato. Recuperado el 26 de octubre del 2019 desde: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/potenciostato>

Mendoza, J., Durán, R., Genescá, J. (s.f). Espectrometría de impedancia electroquímica en corrosión: UNAM

NACE Standard RP-07-75. (2018). Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations. [Tabla].

RT. (2015). 5 claves: ¿Qué pasará con el mundo cuando se agote el petróleo? Recuperado el 23 de noviembre del 2019 desde: <https://actualidad.rt.com/economia/187312-claves-mundo-futuro-fin-petroleo>

Scalebuster. (s.f). Corrosión de tuberías. [Figura]. Recuperado el 4 de diciembre del 2019 desde <https://www.scalebuster.es/descalcificador/corrosion-de-tuberias/>

Schlumberger Oilfield Glossary. (s.f). Índice de Corrosión. Recuperado el 23 de noviembre del 2019 desde: https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/c/corrosion_rate.aspx

Takht, M. (2019). Catalytic Upgrading of Bio-oil for Production of Drop-In Fuels. In: Martínez L., Kharissova O., Kharisov B. (eds) Handbook of Ecomaterials.

Tecnología de Procesos Industriales. (s.f). Tipos de Corrosión. Recuperado el 11 de diciembre del 2019 desde <http://www.tpi.cl/pdf/biblioteca/industrial/corros2.pdf>

Yarelys, M., Corvo, F., Castañeda, A., et al. (2007). Influencia de diferentes factores ambientales en la corrosión de metales. Grupo de Protección de Materiales y Corrosión: La Habana

ANEXO A: METALOGRAFÍAS PREVIAS Y POSTERIORES A LA CORROSIÓN DE LOS MATERIALES

Probetas del experimento de flujo interno previo a la corrosión del acero 1018

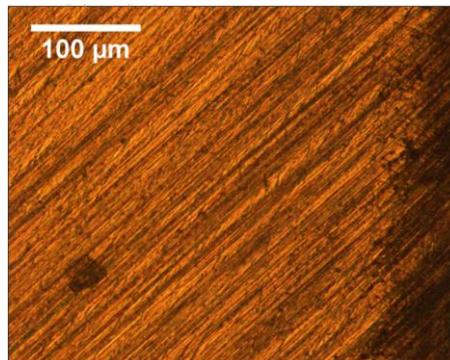


Figura 31. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero 1018

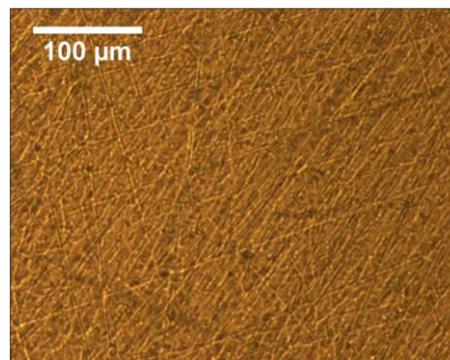


Figura 32. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero 1018

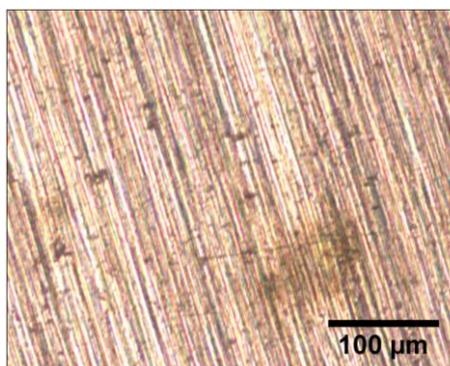


Figura 33. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero 1018

Probetas del experimento de flujo interno posterior a la corrosión del acero 1018

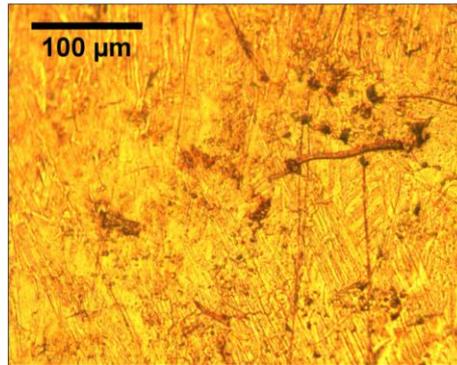


Figura 34. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero 1018 corroído

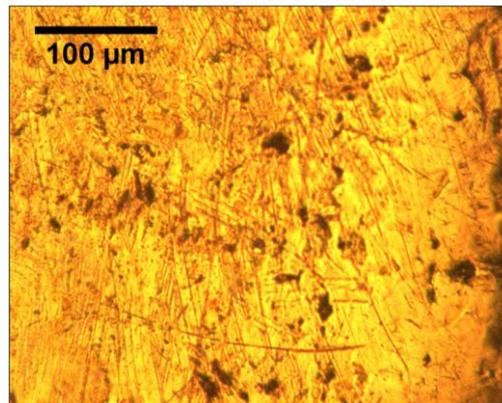


Figura 35. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero 1018 corroído

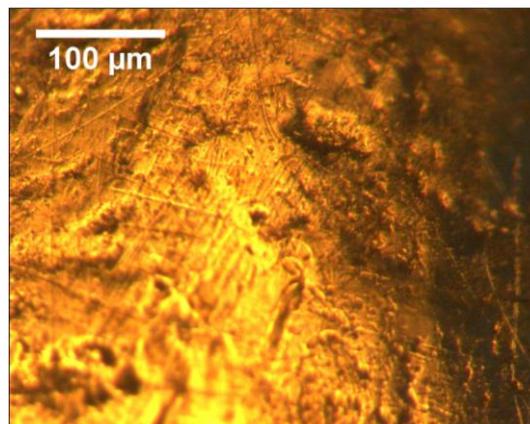


Figura 36. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero 1018 corroído

Probetas del experimento del cilindro rotativo previo a la corrosión del acero 1018

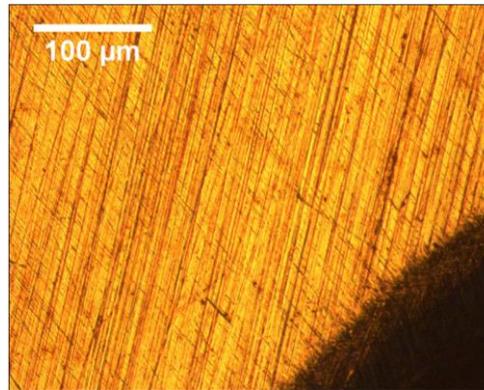


Figura 37. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero 1018

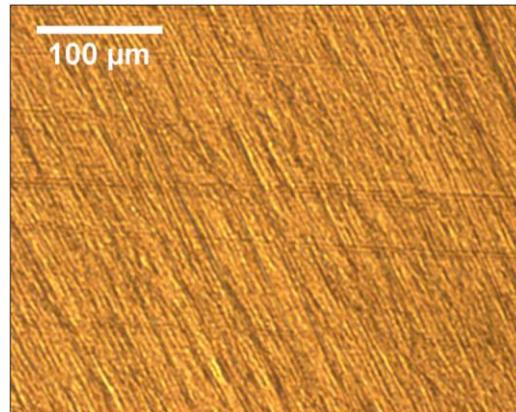


Figura 38. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero 1018

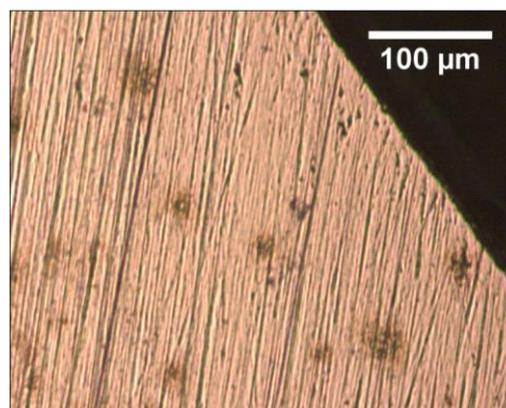


Figura 39. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero 1018

Probetas del experimento del cilindro rotativo posterior a la corrosión del acero 1018

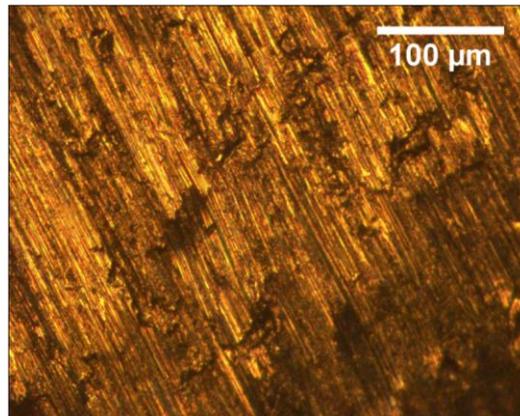


Figura 40. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído

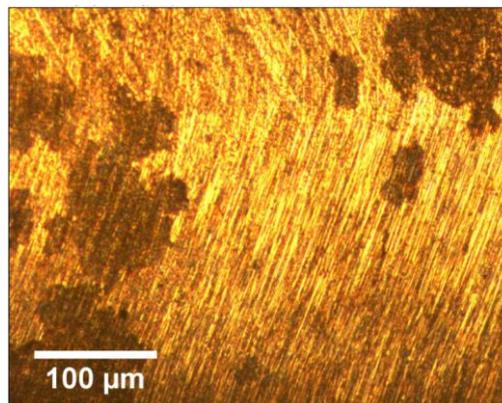


Figura 41. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído

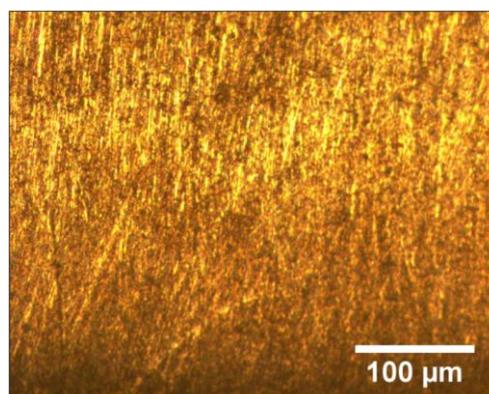


Figura 42. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero 1018 corroído

Probetas internas del experimento jet impingement previo a la corrosión del acero 1018

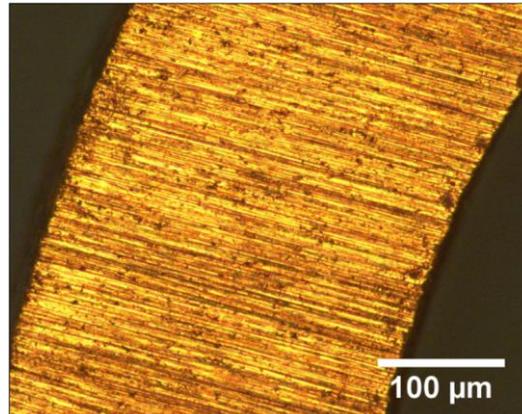


Figura 43. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero 1018

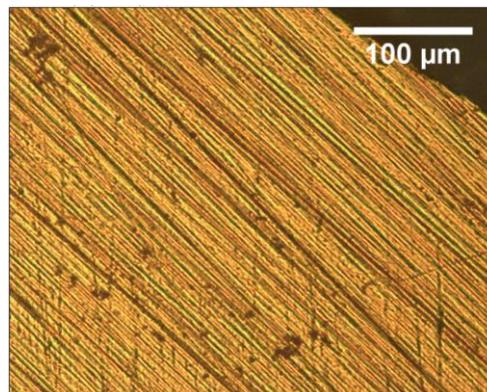


Figura 44. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero 1018

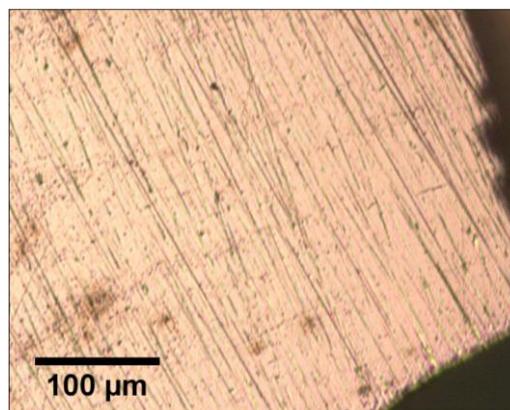


Figura 45. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero 1018

Probetas internas del experimento jet impingement posterior a la corrosión del acero 1018

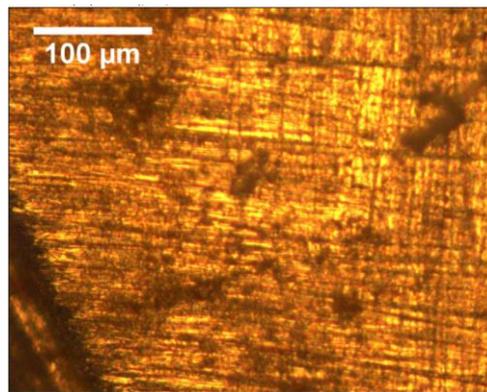


Figura 46. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero 1018 corroído

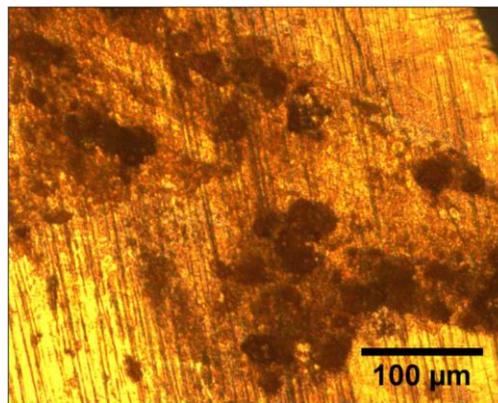


Figura 47. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero 1018 corroído

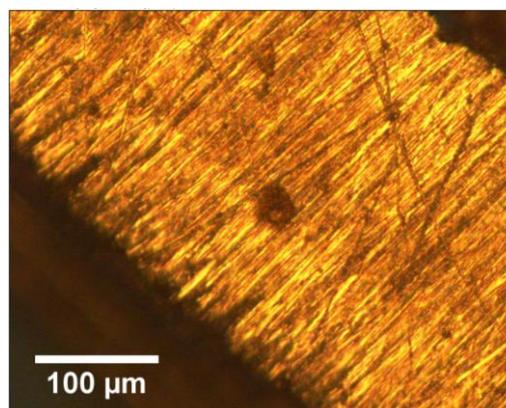


Figura 48. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero 1018 corroído

Probetas externas del experimento jet impingement previo a la corrosión del acero 1018

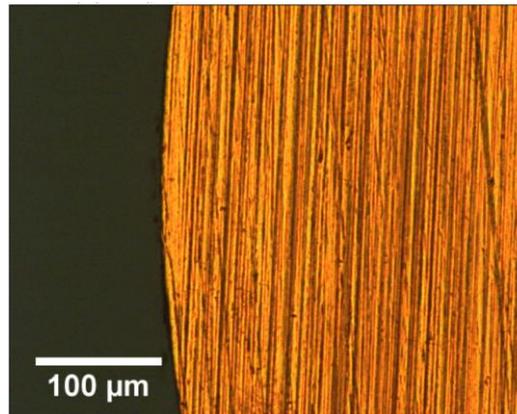


Figura 49. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero 1018

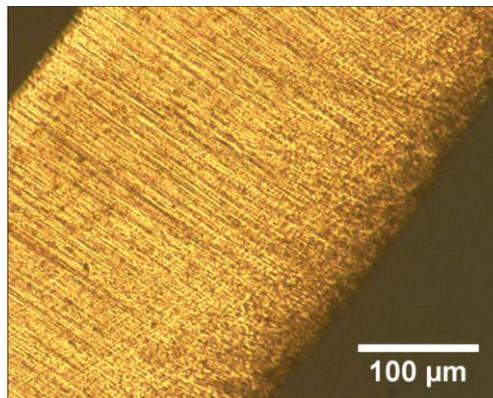


Figura 50. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero 1018

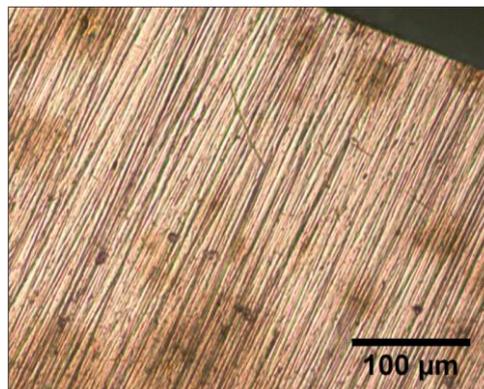


Figura 51. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero 1018

Probetas externas del experimento jet impingement posterior a la corrosión del acero 1018

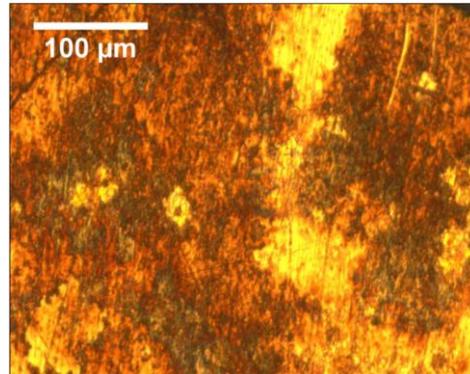


Figura 52. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero 1018 corroído

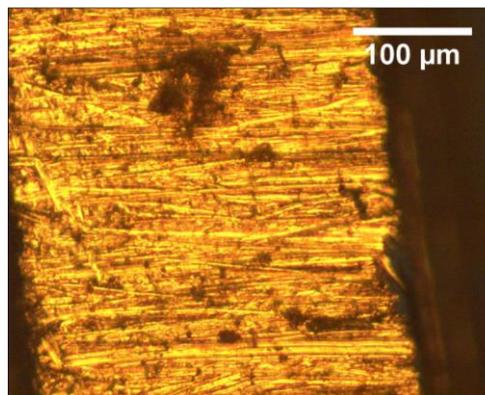


Figura 53. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero 1018 corroído

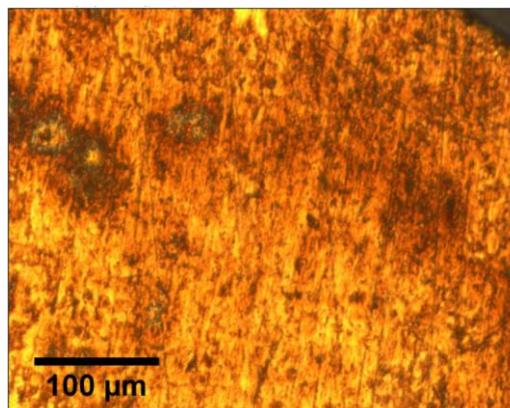


Figura 54. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero 1018 corroído

Probetas del experimento de flujo interno previo a la corrosión del acero API 5LX65

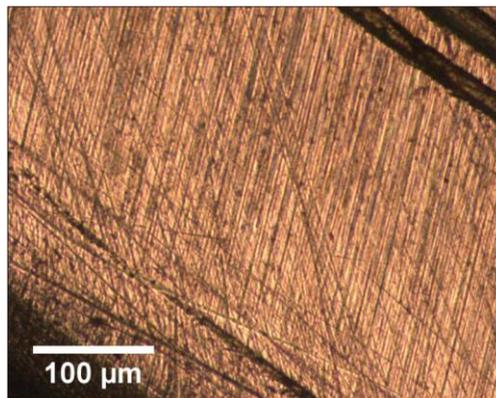


Figura 55. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero API 5LX65

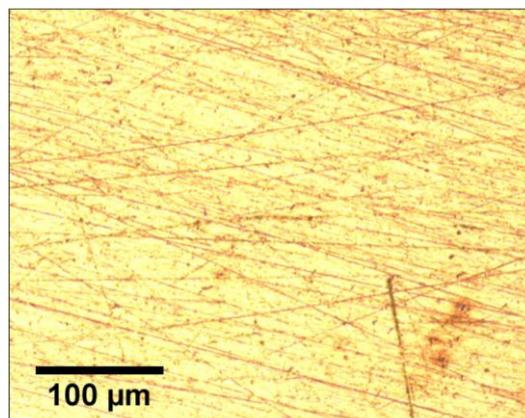


Figura 56. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero API 5LX65

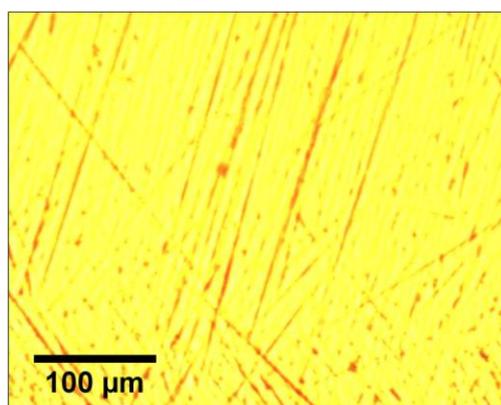


Figura 57. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero API 5LX65

Probetas del experimento de flujo interno posterior a la corrosión del acero API 5LX65

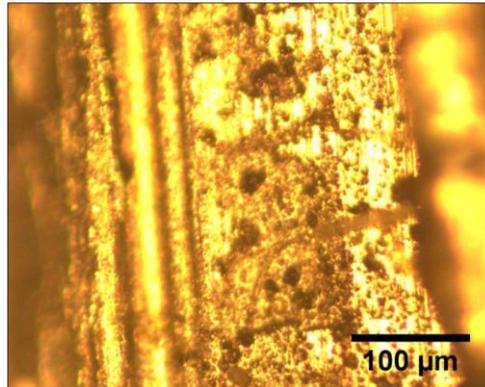


Figura 58. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído

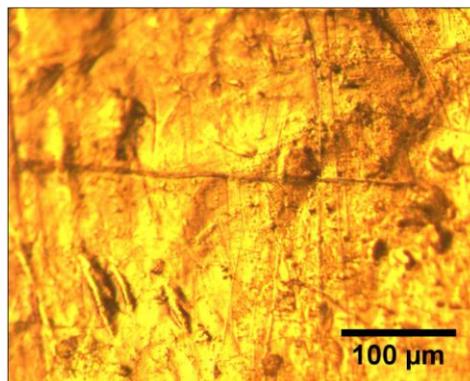


Figura 59. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído

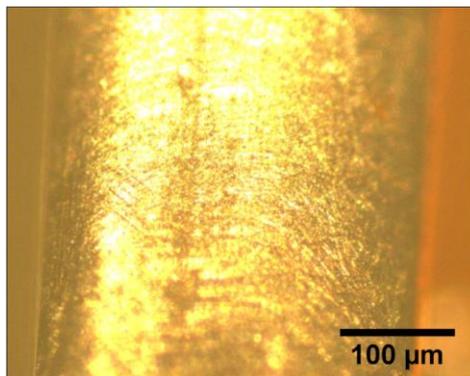


Figura 60. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del flujo interno del acero API 5LX65 corroído

Probetas del experimento del cilindro rotativo previo a la corrosión del acero API 5LX65

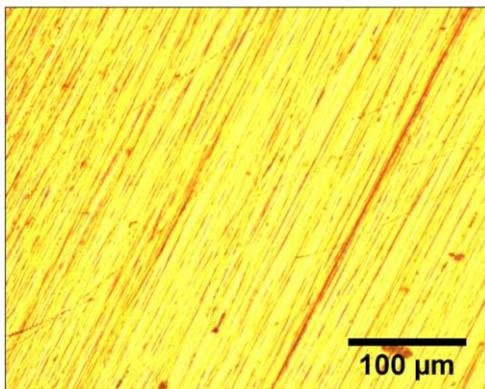


Figura 61. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero API 5LX65

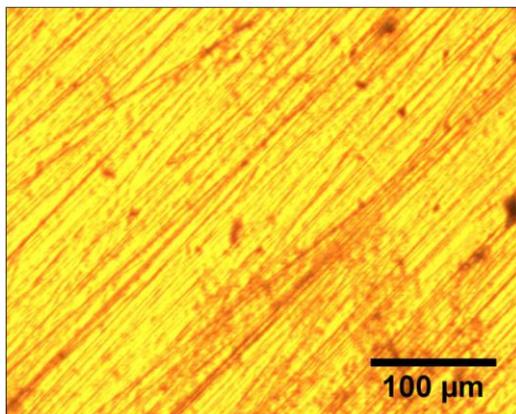


Figura 62. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero API 5LX65

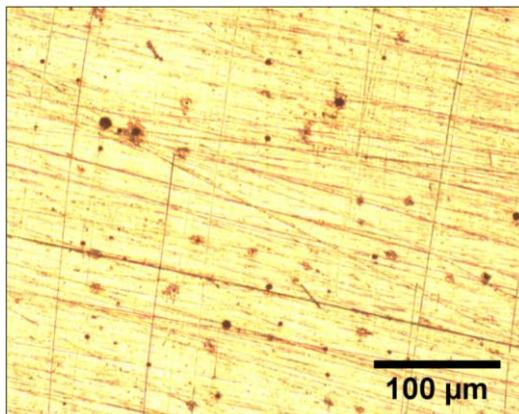


Figura 63. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero API 5LX65

Probetas del experimento del cilindro rotativo posterior a la corrosión del acero API 5LX65

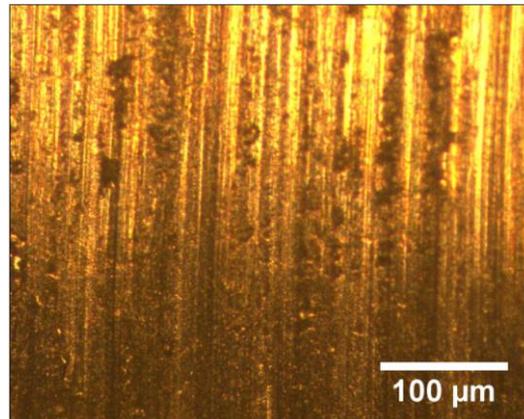


Figura 64. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 1 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído

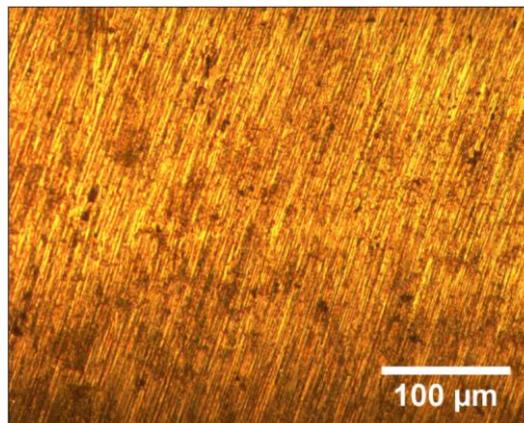


Figura 65. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 2 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído

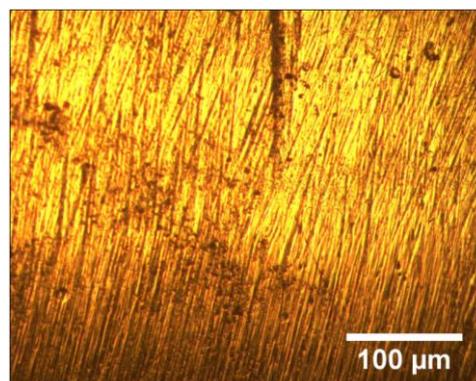


Figura 66. Metalografía óptica a magnificación 100X de la serie 3 del cilindro rotativo del acero API 5LX65 corroído

Probetas internas del experimento jet impingement previo a la corrosión del acero API

5LX65

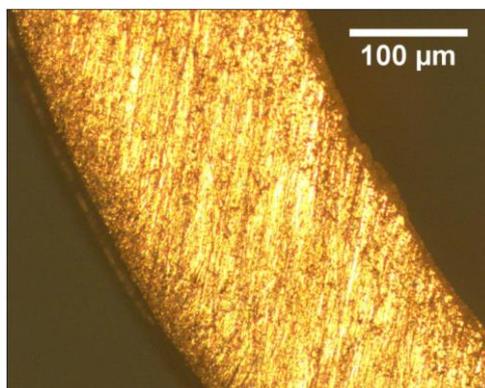


Figura 67. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65

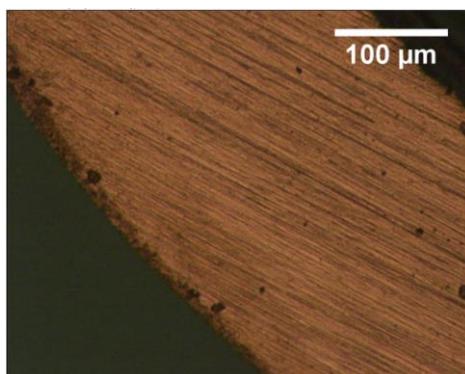


Figura 68. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65

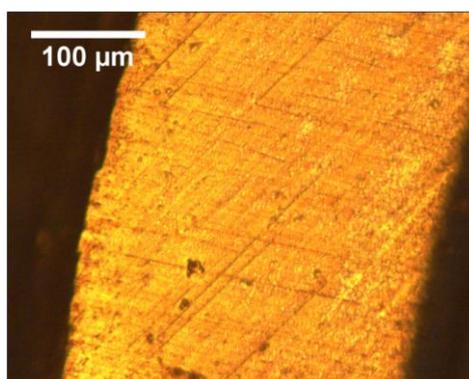


Figura 69. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65

Probetas internas del experimento jet impingement posterior a la corrosión del acero API
5LX65

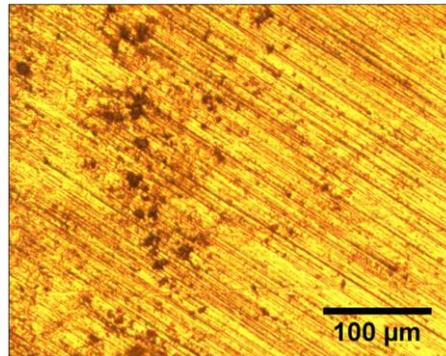


Figura 70. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

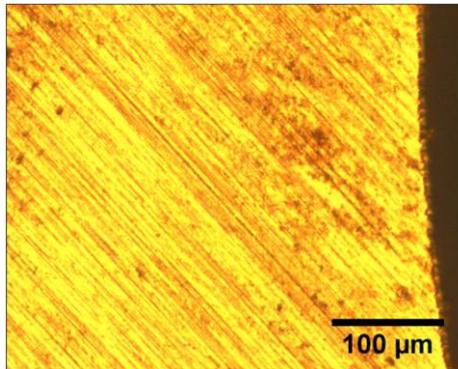


Figura 71. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

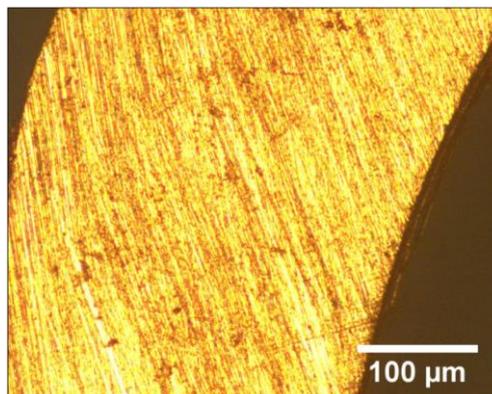


Figura 72. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta interna de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

Probetas externas del experimento jet impingement previo a la corrosión del acero API
5LX65

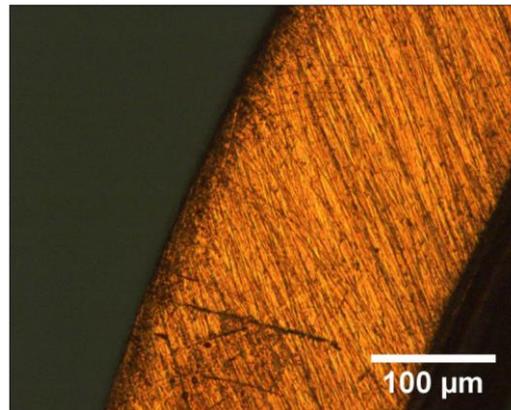


Figura 73. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65

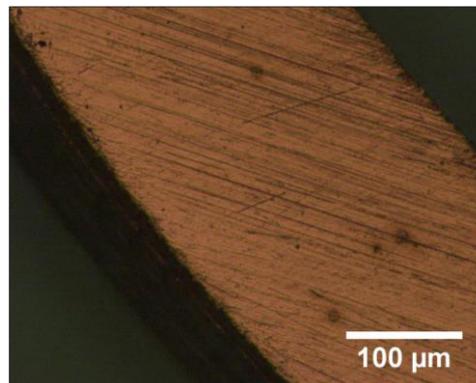


Figura 74. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65

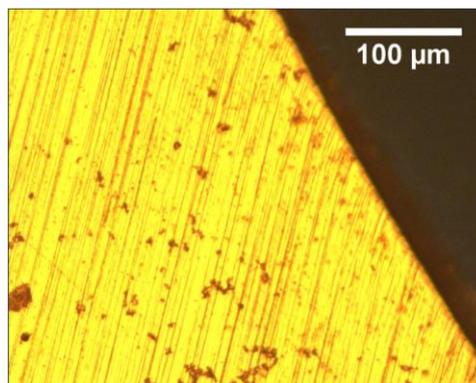


Figura 75. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65

Probetas externas del experimento jet impingement posterior a la corrosión del acero API
5LX65

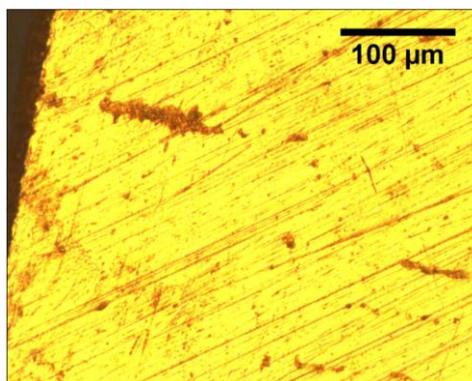


Figura 76. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 1 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

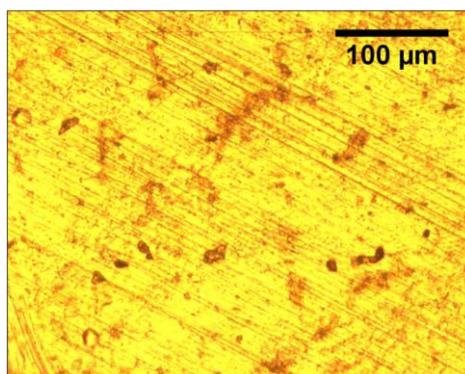


Figura 77. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 2 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

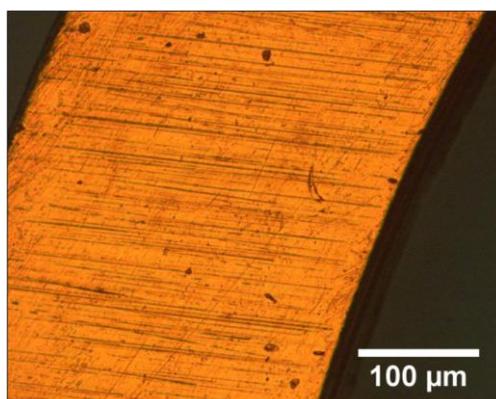


Figura 78. Metalografía óptica a magnificación 100X de la probeta externa de la serie 3 del jet impingement del acero API 5LX65 corroído

ANEXO B: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL BIOCRUDO

Identified compound name
tetrahydrofuran (solvent)
benzene
1,3-pentadiene, 2,3-dimethyl-
1-pentene, 2,4,4-trimethyl-
cyclopentene, 1,5-dimethyl-
cyclohexane, 1,3-dimethyl-, cis-
cyclopentene, 1,5-dimethyl-
toluene
1,3-dimethyl-1-cyclohexane
cyclohexane, 3,5-dimethyl
methyl ethyl cyclopentene
spiro[2,4]heptane, 4-methylene-
ethylbenzene
benzene, 1,3-dimethyl-
1,5,5-trimethyl-6-methylene-cyclohexene
cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-, (S)-
benzene, 1-ethyl-3-methyl-
benzene, 1-ethyl-2-methyl-
benzene, 1,2,3-trimethyl-
benzene, 1,2,4-trimethyl-
1,3-cyclohexadiene, 1,5,5,6-tetramethyl-
.alpha.-methylstyrene
benzene, 1,2,4-trimethyl-
cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-, (R)-
benzene, 1-methyl-3-(1-methylethyl)-
D-limonene
indane
indene
benzene, 1-ethyl-2,3-dimethyl-
benzene, 1-methyl-4-(1-methylethyl)-
benzene, 1-methyl-2-(1-methylethyl)-
cyclohexene, 1-methyl-4-(1-methylethylidene)-
indan, 1-methyl-
benzene, 1-methyl-4-(1-methylethenyl)-
benzene, 1-methyl-4-(1-methylpropyl)-
benzene, 1,2,4,5-tetramethyl-
benzene, pentamethyl-
benzene, 2-ethenyl-1,4-dimethyl-
benzene, 1-ethenyl-4-ethyl-
benzene, (1-methyl-2-cyclopropene-1-yl)-
1H-indene, 1-methyl-
2-methylindene
benzene, (1-methyl-2-cyclopropene-1-yl)-
1H-indene, 2,3-dihydro-1,6-dimethyl-
naphthalene
1H-indene, 2,3-dihydro-1,1-dimethyl-

benzothiazole
1H-indene, 1,3-dimethyl-
1H-indene, 1,3-dimethyl-
naphthalene, 2-methyl-
naphthalene, 1-methyl-
naphthalene, 1,2,3,4-tetrahydro-1,8-dimethyl-
1,2,3-trimethylindene
1,2,3-trimethylindene
naphthalene, 2-ethenyl-
benzo[b]thiophene, 2,7-dimethyl-
naphthalene, 2,6-dimethyl-
naphthalene, 2,3-dimethyl-
naphthalene, 2,7-dimethyl-
1,1'-biphenyl, 3-methyl-
acenaphthene
naphthalene, 1,4,6-trimethyl-
naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
naphthalene, 1,6,7-trimethyl-
naphthalene, 1,4,6-trimethyl-
fluorene
naphthalene, 1,2,3,4-tetramethyl-
9H-fluorene, 1-methyl-
2,2'-dimethylbiphenyl
phenanthrene
phenanthrene, 2-methyl-
phenanthrene, 1-methyl-
naphthalene, 2-phenyl-
fluoranthene
pyrene
phenanthrene, 2,3,5-trimethyl-
phenanthrene, 1-methyl-7-(1-methylethyl)-
pyrene, 1-methyl
pyrene, 4-methyl
pyrene, 4-methyl
pyrene, 2-methyl

ANEXO C: FUNCIONAMIENTO Y LIMPIEZA DE LA MÁQUINA

Para dar lugar al funcionamiento de la máquina, primero se debe conectar una extensión en cable 12 AWG directamente a la caja de breakers, de manera que el enchufe tanto de las bombas como del motor se sitúen en los conectores de la extensión. A continuación, se debe retirar la tapa del experimento de jet impingement y colocar en la parte superior de la misma sus dos probetas correspondientes, las cuales se mantienen fijas mediante el ajuste de un prisionero utilizando una llave hexagonal. Posteriormente, se retira la tapa del experimento cilindro rotativo, y en la parte inferior del mecanismo de esta se inserta la probeta. A continuación, se desmonta el sistema de flujo interno, es decir, se retiran la probeta de grafito, cauchos y cilindro de duralón, para colocar la arandela del metal, de manera que se unen todos estos elementos de manera fija utilizando un eje para centrarlos y se pueda proceder al ajuste de todo este sistema mediante pernos.

En segundo lugar, se colocan 40 litros de fluido en el recipiente del reservorio, se procede a tapanlo; se abren las llaves de las válvulas de la entrada y salida de las bombas, de cada experimento y de entrada al reservorio; por último, se presiona cada uno de los botones de encendido para que las bombas y el motor funcionen.

A continuación, una vez que el mecanismo ha trabajado de manera continua por 9 horas, se cierran las llaves de las válvulas de los mismos elementos del anterior paso; se retiran cada una de las probetas de la misma manera que se las introdujo, y se retira el fluido del reservorio.

Finalmente, se procede a la limpieza de todo el mecanismo, se retiran las bombas de sus posiciones y se coloca 1 litro de acetona por la boquilla de las mismas para que individualmente separe las impurezas que contengan tras el paso del fluido; a continuación, se colocan las bombas en su posición normal y se colocan 20 L de acetona en el reservorio; se

abren todas las llaves de paso y válvulas, y se enciende todo el mecanismo, bombas y motor durante un tiempo de 10 minutos para que la acetona circule por todas las tuberías, recipientes, válvulas, y demás elementos que contiene el mismo y se liberen de impurezas o cualquier tipo de residuo que pueda ocasionar daños en la máquina. Una vez transcurrido este tiempo, se procede a apagar todo el mecanismo y se retira el fluido del reservorio.