

EVALUACIÓN ELECTROQUÍMICA DE FLUIDOS UTILIZADOS EN LA INDUSTRIA DEL GAS Y PETRÓLEO: DESDE EL LABORATORIO AL CAMPO.

¹A. Pellicano, ²J.P. Rossi, ³S. Ceré

¹ Sintec S.A. - Colón 3083 8° Piso - Mar del Plata – Bs. As. – Argentina – apellicano@sintecsa.com.ar

² Sintec S.A. – Colón 3083 8° Piso - Mar del Plata – Bs. As. – Argentina – jprossi@sintecsa.com.ar

³Div. Electroquímica y Corrosion. INTEMA-CONICET-UNMdP- Juan B. Justo 4302. Mar del Plata- Bs As. –Argentina. smcere@fi.mdp.edu.ar

Sinopsis

Los tubulares y cañerías utilizadas en la industria del petróleo y del gas son susceptibles al ataque por corrosión debido a la presencia de una fase acuosa agresiva en el fluido. Las fallas asociadas a los procesos de corrosión generan un fuerte impacto económico y al medio ambiente, poniendo en riesgo la seguridad del personal. La comprensión de los mecanismos de daño actuantes y la implementación de estrategias de mitigación eficientes permitirán optimizar los recursos asociados a la operación y el mantenimiento, minimizando la aparición de fallas eventuales.

En este trabajo se propone implementar una etapa previa de evaluación electroquímica en laboratorio. Los ensayos de laboratorio deben ser realizados utilizando el material de las cañerías y tubulares en servicio en los yacimientos en contacto con electrolitos que simulen la fase corrosiva en los ductos. Por medio de métodos electroquímicos de corriente alterna y continua, es posible establecer diferencias en la corrosividad de diferentes formulaciones y concentraciones de productos químicos dosificados en las cañerías y evaluar el efecto que producen sobre el material metálico. Los estudios propuestos se complementan con la caracterización de los productos de corrosión por DRX (difracción de rayos X), FRX (fluorescencia por rayos X), análisis microscópico de la superficie y modelado de los ensayos de corrosión para establecer los posibles mecanismos actuantes en el evento de corrosión.

Este trabajo presenta la relevancia y las diferentes potencialidades de los ensayos de laboratorio como un paso previo a la operación para optimizar recursos en el proceso.

Palabras clave: corrosión- optimización –ensayos electroquímicos- predicción

1. Introducción

El presente trabajo está orientado a la presentación de métodos empleados en los laboratorios de corrosión para establecer la agresividad de un medio (fluido o sólido) en contacto con aleaciones de metal utilizados en la industria y evaluar la incidencia de diferentes inhibidores.

El proceso corrosivo es la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente metálico, y el medio circundante, que produce el deterioro del mismo o un decaimiento en sus propiedades. Cuando el ataque se produce en la totalidad de la superficie del material degradado, debido a que las áreas anódicas y catódicas se encuentran uniformemente distribuidas sobre la superficie, la corrosión es de tipo generalizada o uniforme. En contraposición, cuando el ataque se produce en zonas puntuales sobre la superficie de la pieza afectada, en donde la densidad de corriente anódica es mucho mayor que la catódica, la forma de corrosión presente se conoce como corrosión localizada.

La forma de evaluar en laboratorio el compartamiento de un metal en contacto con una fase potencialmente agresiva es mediante la realización de ensayos electroquímicos. Estos estudios permiten evaluar en condiciones contraloras el comportamiento del metal o aleación en contacto con soluciones agresivas, inhibidas o no. Para la realización y análisis de estos ensayos se utilizan celdas de tres electrodos (electrodos de trabajo, contra electrodo y referencia), unidades de medición electroquímica, sistemas de control (temperatura, pH, caudal, etcétera), sistemas de adquisición y procesamiento de datos y software de análisis.

Los ensayos aplicables para evaluación del comportamiento frente a la corrosión de un metal o aleación específica son los siguientes:

- Curvas de polarización cíclica. Este ensayo permite analizar comparativamente la resistencia de la aleación de trabajo a la corrosión localizada, bajo distintas condiciones del medio (con o sin tratamiento, considerando una o más diluciones).
- Ensayos de impedancia electroquímica. Esta técnica permite analizar dos efectos en forma individual: a) corrosividad de la solución de tratamiento y/o del fluido de trabajo; b) comportamiento de la película de producto formada, para verificar posibles efectos de componentes individuales (tal como sucede con productos compuestos, como solución de estimulación o limpieza ácida inhibida).
- Resistencia de Polarización. Esta técnica permite medir velocidad de corrosión generalizada, para aleaciones bajo comportamiento activo.

Usualmente estas técnicas se complementan con otros estudios de laboratorio que brindan un mayor conocimiento del proceso, ya sea por la caracterización morfológica del ataque corrosivo mediante microscopía óptica o SEM (Microscopia Electrónica de Barrido), así como por la identificación de las compuestos o elementos presentes por microscopia Raman, DRX, FRX y EDS (Espectroscopía de Energía Dispersa).

Con la idea de adaptar las técnicas de laboratorio para su utilización en el campo, se han desarrollado una serie de sensores que permiten medir *in situ* los mecanismos y parámetros fundamentales asociados al proceso de degradación activo, y evaluar el comportamiento del fenómeno frente a la implementación de un programa de protección anticorrosiva.

2. Desarrollo: Analisis en Laboratorio

2.1. Condiciones del ensayo

Como paso inicial en el proceso de estudio es necesario establecer los sistemas y las condiciones a evaluar, considerando los siguientes aspectos:

- 2.1.1. Materiales: aleaciones comerciales utilizadas como materiales en tubulares, cañerías y equipos, sometidas a cualquier tratamiento químico específico.
- 2.1.2. Soluciones de ensayo: es necesario conocer las condiciones operativas y la composición del fluido o sólido en contacto con el material bajo estudio. Se debe indicar las soluciones preparadas, indicando la calidad de las drogas utilizadas, y la solución utilizada como “blanco” en los protocolos de medición.
- 2.1.3. Productos: en caso de adicionarse productos químicos con algún objetivo específico, como el control de la corrosión (inhibidores de corrosión, bactericidas, secuestrantes), mejoramiento del proceso (inhibidores de incrustación, ácidos para estimulación, etcétera), es necesario conocer el programa de dosificación en servicio (concentración, metodología de dosificación, frecuencia, etcétera). Se deben preparar diluciones consistentes con las recomendaciones del proveedor y de acuerdo a las dosis típicas de tratamientos en campo.
- 2.1.4. Parámetros de los ensayos. Se deben especificar los parámetros utilizados en los ensayos:
 - a) medición del potencial de corrosión (E_{corr}) en el tiempo hasta su estabilización,
 - b) ensayo EIS: modulación de la tensión modulando (V_{rms}) y barrido de frecuencias (Hz).
 - c) ensayo de resistencia a la polarización (R_p): variación del potencial respecto a E_{corr} ($\pm V$) y velocidad de barrido (Vs^{-1}).
 - d) pendientes de Tafel, anódica y catódica, indicando potencial de inicio y llegada (V), y la velocidad de barrido (Vs^{-1}).
- 2.1.5. Setup del ensayo: unidad de medición electroquímica, referencia utilizado, medidor de temperatura y pH.
- 2.1.6. Preparación de los Electrodos. Las muestras metálicas deben ser preparadas, de manera de exponer un área controlada a la solución de trabajo. El material debe ser acondicionado mediando pulido hasta una granulometría especificada y enjuagado con agua destilada previo a su inmersión en la solución de trabajo.

2.2. Evaluación Comparativa de Inhibidores de Corrosión

2.2.1. Ensayos Electroquímicos

Se realizaron ensayos electroquímicos de corriente continua (resistencia a la polarización - curvas de polarización) y ensayos de corriente alterna (espectroscopía de impedancia electroquímica, EIS), utilizando como electrodo de trabajo muestras acero al carbono extraídas de cañerías provistas por el cliente.

Previo a cada ensayo se midió del potencial de corrosión (E_{corr}) en el tiempo hasta su estabilización. Los ensayos de EIS se realizaron en el entorno de E_{corr} , modulando ± 0.010 V (rms) y realizando un barrido de frecuencias desde 50000 a 0.05 Hz. Los ensayos de resistencia a la polarización se hicieron variando el potencial ± 0.015 V respecto a E_{corr} y barriendo el potencial a una velocidad de 0.001 Vs-1. Con el objetivo de obtener las pendientes de Tafel, anódicas y catódicas, y extrapolar para obtener la densidad de corriente de corrosión, se efectuaron curvas de polarización potenciodinámicas, catódicas y anódicas. Las primeras se construyeron partiendo del potencial de corrosión y llegando hasta -0.950 V. Las segundas se construyeron partiendo del potencial de corrosión y llegando hasta -0.200 V. En ambos casos se utilizó una velocidad de barrido de 0.001 V.s⁻¹. Todos los ensayos electroquímicos se realizaron en unidades electroquímicas Gamry PCI4 y Gamry Ref600, y los datos fueron analizados por medio de Zplot y Corware¹.

2.2.2. Preparación de los Electroodos.

Las muestras metálicas fueron incluidas en resina epoxi de manera de exponer un área controlada a la solución de trabajo, y se le realizó un contacto eléctrico en su parte posterior. El material fue pulido con lijas de carburo de silicio hasta granulometría 600 y enjuagado con agua destilada previo a su inmersión en la solución de trabajo.

2.2.3. Soluciones

Como medio básico se tomó una solución de NaCl 10000 ppm², preparada con drogas P.A. y agua destilada, tomando esta solución como “blanco” de los protocolos de medición.

Se recibieron 5 (cinco) muestras de inhibidor de corrosión, rotuladas tal como se indica en la Tabla 1. Se prepararon soluciones de los inhibidores recibidos, en diluciones consistentes con las recomendaciones generales y de acuerdo a las dosis típicas de tratamientos conocidos (Tabla 1).

2.2.4. Celdas de Trabajo

Los ensayos se realizaron en celdas de tres electrodos, usando como referencia un electrodo de calomel saturado (ECS; Radiometer), como electrodo auxiliar un fleje de platino de área conveniente y como electrodo de trabajo el electrodo de acero al carbono (Figura 1).

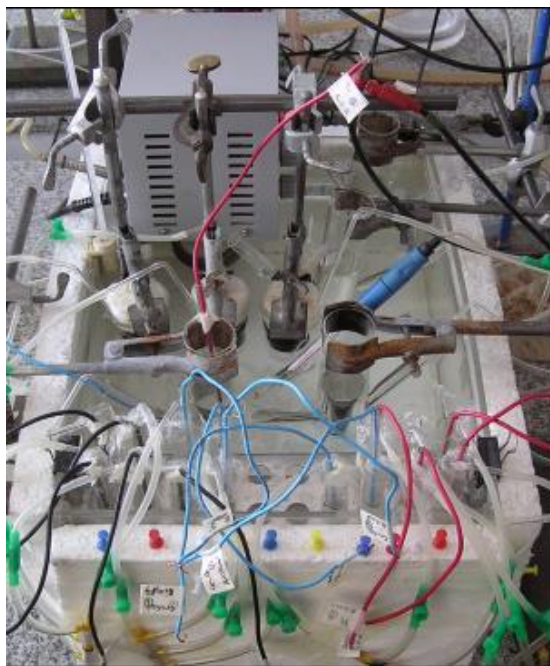


Figura 1: celdas de tres electrodos utilizadas para los ensayos electroquímicos.

Tabla 1. Inhibidores y concentraciones utilizados en los ensayos.

Producto	Concentración mínima (ppm)	Concentración máxima (ppm)
INHIB 1	100.00	300.00
INHIB 2	50.00	150.00
INHIB 3	50.00	150.00
INHIB 4	100.00	300.00
INHIB 5	50.00	150.00

Previo a cada ensayo, la solución fue de-aireada por burbujeo con una corriente de N₂ de alta pureza, durante 15 minutos, seguido de burbujeo con CO₂, durante otros 15 minutos. Cumplido este tiempo se procedió a la inmersión de la muestra recién pulida, manteniendo durante todo el ensayo atmósfera de CO₂ en la celda de trabajo. Todos los ensayos se realizaron controlando la temperatura del sistema a 40 °C. El pH de las soluciones utilizadas fue controlado mediante un equipo Orion Research EA 920, antes y después de la secuencia de ensayos realizados para cada condición estudiada. Cada ensayo se repitió hasta obtener resultados reproducibles.

2.2.5. Resultados y Análisis

En esta sección se presentan los resultados electroquímicos obtenidos para los cinco inhibidores ensayados y su comparación con el electrolito sin inhibidor (blanco, NaCl 10000 ppm). Para todas las condiciones estudiadas, se presenta en color rojo la menor concentración del inhibidor ensayada y en azul la solución más concentrada. El pH de las soluciones al inicio de las medidas estuvo en el entorno de 6.5 ± 0.3 , para todas las diluciones. Las fotos que se presentan al final de cada sección de cada inhibidor fueron tomadas al final de la rutina de ensayo.

2.2.5.1. INHIB 1

La Figura 2 muestra las curvas de polarización anódica y catódica para el inhibidor INHIB 1, bajo dos concentraciones diferentes. En la Figura 3 se presentan los ensayos de resistencia a la polarización (LPR) para las dos concentraciones del inhibidor (la línea verde es el ajuste lineal utilizado para obtener el valor de RP).

En la Figura 4 se presentan los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para las dos concentraciones del inhibidor INHIB 1 y su comparación con el blanco. Los resultados se presentan en forma de diagramas de Nyquist (izquierda) y de Bode (derecha).

En la Figura 5 se presentan las fotos de los electrodos de trabajo luego de la secuencia de ensayos.

Los resultados obtenidos para el inhibidor INHIB 1 muestran que, para las dos concentraciones probadas, no se verifican alteraciones con respecto a la curva de polarización anódica correspondiente al blanco. Sí se registra variación en la curva catódica. En lo que hace al impacto sobre la densidad de corriente de corrosión, solamente la solución más concentrada verifica densidades más bajas que las del blanco. No obstante, aún bajo la concentración más elevada, el incremento en RP es inferior a un orden de magnitud.

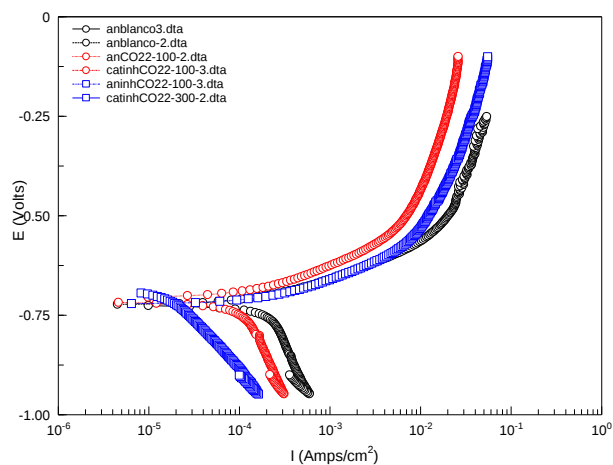


Figura 2: Curvas de polarización anódicas y catódicas para el inhibidor INHIB 1, con 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul) de inhibidor, y su comparación con el electrolito sin inhibir (negro).

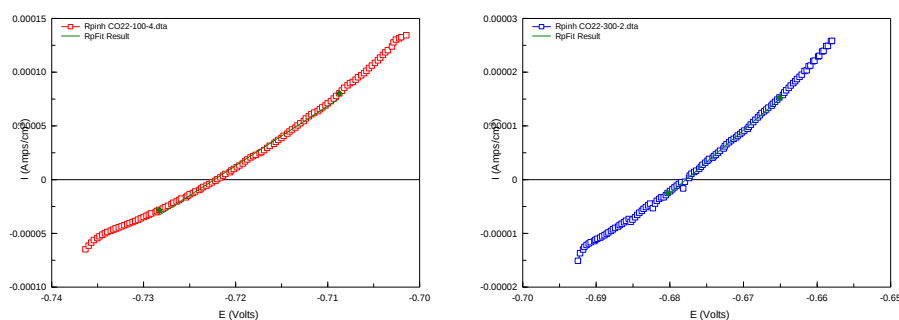


Figura 3: Ensayos de RP para INHIB 1, con 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul).

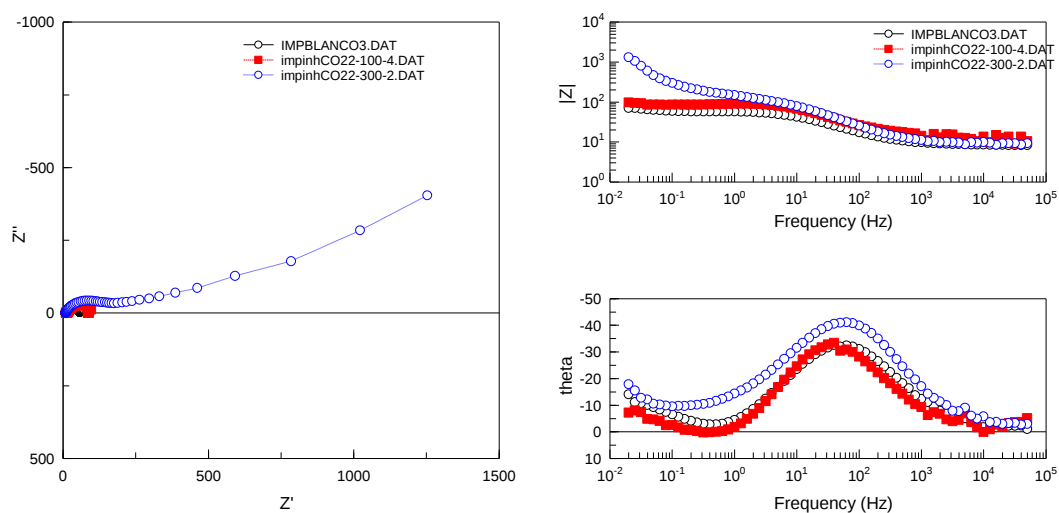


Figura 4: Ensayos de EIS para INHIB 1, con 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul). En negro se presenta el electrolito sin inhibidor (NaCl 10000 ppm).



Figura 5: fotografías de las muestras ensayadas en la solución de INHIB 1, con 100 ppm (izquierda) y en el electrolito sin inhibidor (derecha).

2.2.5.2. INHIB 2

La Figura 6 muestra las curvas de polarización anódica y catódica para el inhibidor INHIB 1, bajo dos concentraciones diferentes. En la Figura 7 se presentan los ensayos de resistencia a la polarización (LPR) para las dos concentraciones del inhibidor (la línea verde es el ajuste lineal utilizado para obtener el valor de RP).

En la Figura 8 se presentan los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para las dos concentraciones del inhibidor INHIB 1 y su comparación con el blanco. Los resultados se presentan en forma de diagramas de Nyquist (izquierda) y de Bode (derecha).

En la Figura 9 se presentan las fotos de los electrodos de trabajo luego de la secuencia de ensayos.

Los resultados de los ensayos para el inhibidor INHIB 2, a bajas concentraciones, son similares a los del INHIB 1, sin mostrar evidencia de que se produzcan efectos significativos con respecto al electrolito sin inhibir, más allá de una leve mejora en los valores de RP y en el módulo de impedancia a baja frecuencia. En concentraciones mayores se produce un desplazamiento de las curvas anódicas y catódicas hacia menores densidades de corriente, mostrando un efecto inhibitorio, que se ve reflejado también en los ensayos de RP y EIS.

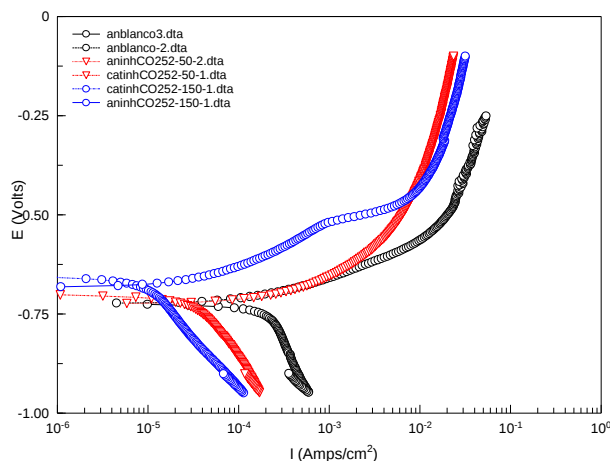


Figura 6: Curvas de polarización anódicas y catódicas para el inhibidor INHIB 2, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul) de inhibidor, y su comparación con el electrolito sin inhibir (negro).

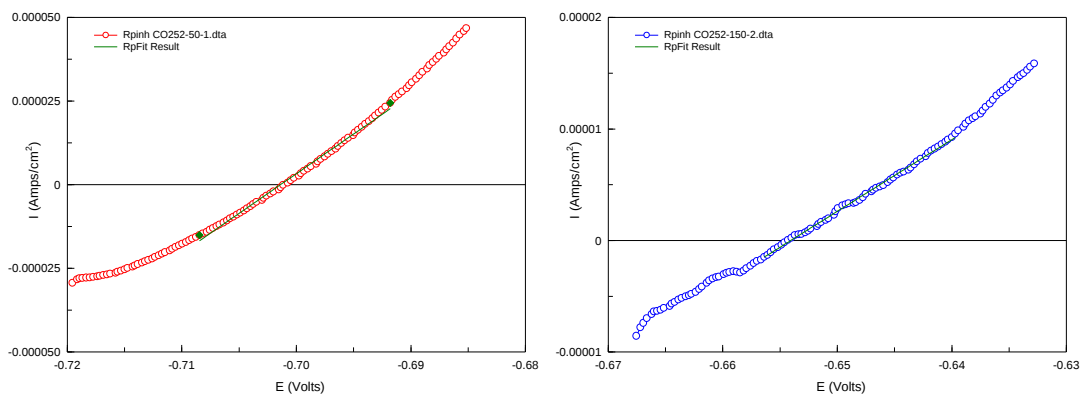


Figura 7: Ensayos de RP para INHIB 2, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul).

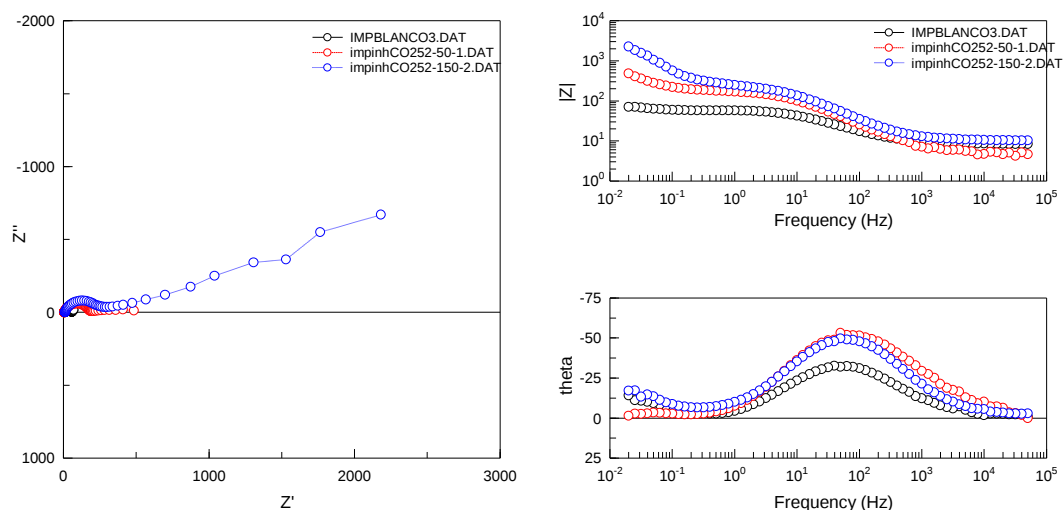


Figura 8: Ensayos de EIS para INHIB 2, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul). En negro se presenta el electrolito sin inhibidor (NaCl 10000 ppm).

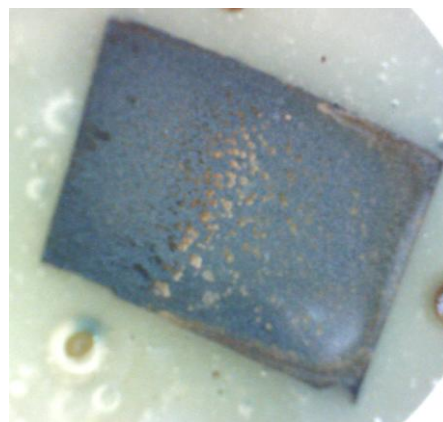
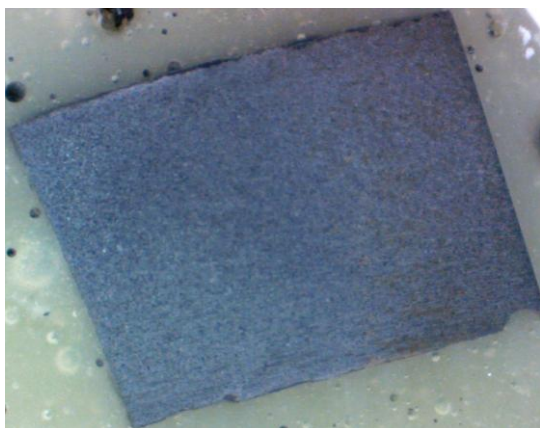


Figura 9: Fotografías de las muestras ensayadas bajo las soluciones de INHIB 2 para 50 ppm (izquierda) y 150 ppm (derecha).

2.2.5.3. INHIB 3

La Figura 10 muestra las curvas de polarización anódica y catódica para el inhibidor INHIB 3, bajo dos concentraciones diferentes. En la Figura 11 se presentan los ensayos de resistencia a la polarización (LPR) para las dos concentraciones del inhibidor (la línea verde es el ajuste lineal utilizado para obtener el valor de RP).

En la Figura 12 se presentan los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para las dos concentraciones contempladas y su comparación con el blanco. Los resultados se presentan en forma de diagramas de Nyquist (izquierda) y de Bode (derecha).

En la Figura 13 se presentan las fotos de los electrodos de trabajo luego de la secuencia de ensayos.

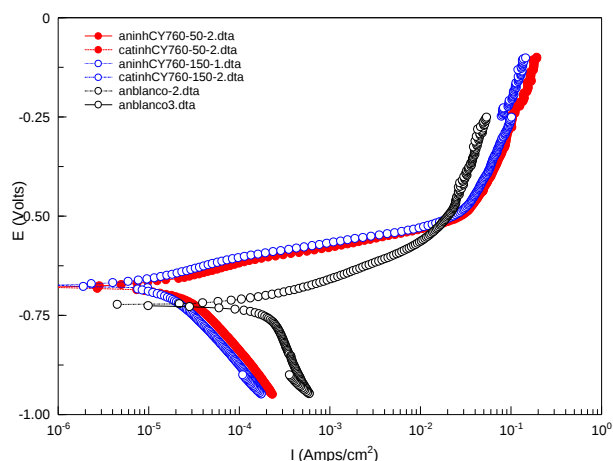


Figura 10: Curvas de polarización anódicas y catódicas para el inhibidor INHIB 3, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul) de inhibidor, y su comparación con el electrolito sin inhibir (negro).

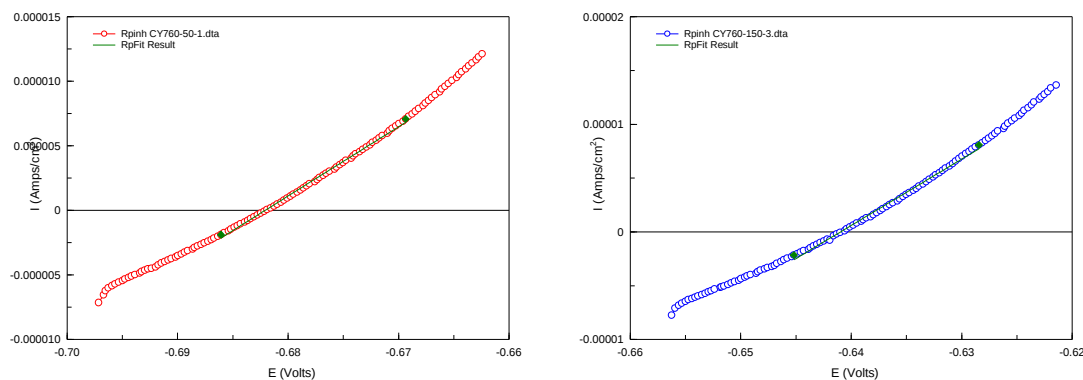


Figura 11: Ensayos de RP para INHIB 3, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul).

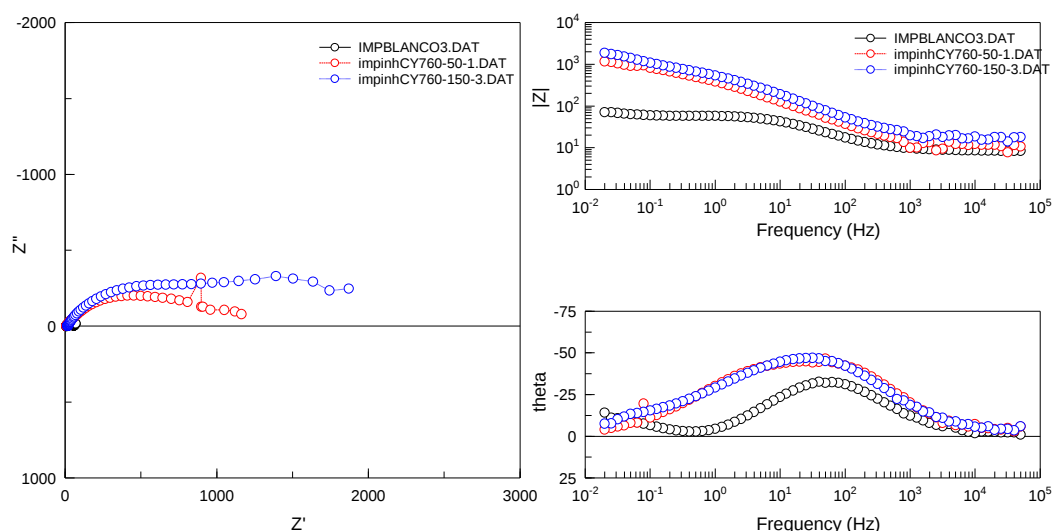


Figura 12: Ensayos de EIS para INHIB 3 para 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul). En negro se presenta el electrolito sin inhibidor (NaCl 10000 ppm).



Figura 13: Fotografías de las muestras ensayadas bajo las soluciones de INHIB 3 para 50 ppm (izquierda) 150 ppm (derecha).

El inhibidor INHIB 3 presenta un efecto inhibitorio anódico y catódico sobre la aleación de trabajo, para ambas concentraciones analizadas, produciendo un corrimiento sensible en la densidad de corriente, con respecto a la correspondiente al blanco, hacia valores inferiores en más de un orden de magnitud. Tanto RP como el módulo de impedancia a bajas frecuencias verifican un incremento superior a un orden de magnitud con respecto a la solución sin inhibir.

2.2.5.4. INHIB 4

La Figura 14 muestra las curvas de polarización anódica y catódica para el inhibidor INHIB 4, bajo dos concentraciones diferentes. En la Figura 15 se presentan los ensayos de resistencia a la polarización (LPR) para las dos concentraciones del inhibidor (la línea verde es el ajuste lineal utilizado para obtener el valor de RP).

En la Figura 16 se presentan los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para las dos concentraciones contempladas y su comparación con el blanco. Los resultados se presentan en forma de diagramas de Nyquist (izquierda) y de Bode (derecha).

En la Figura 17 se presentan las fotos de los electrodos de trabajo luego de la secuencia de ensayos.

De la misma forma que se observa en el caso del INHIB 3, el inhibidor INHIB 4 también induce un desplazamiento en las curvas anódicas y catódicas hacia menores valores de densidad de corriente con respecto al blanco, pero el efecto es mucho menos pronunciado (no se alcanza un orden de magnitud). Los

resultados de RP y EIS muestran un incremento significativo, con la insinuación de una segunda constante de tiempo incompleta en la zona de baja frecuencias, asociado a la formación de un film sobre la superficie.

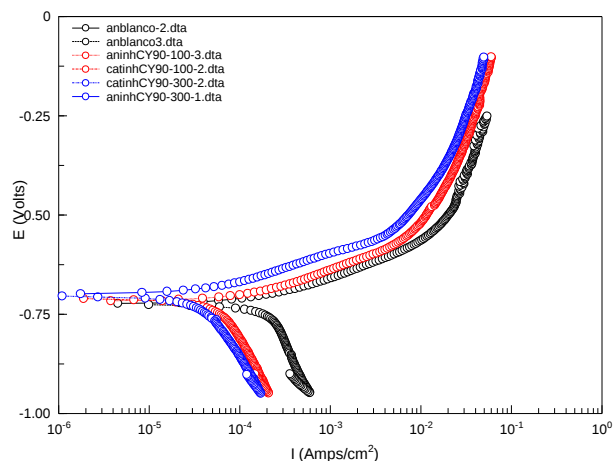


Figura 14: Curvas de polarización anódicas y catódicas para el inhibidor INHIB 4, con 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul) de inhibidor, y su comparación con el electrolito sin inhibir (negro).

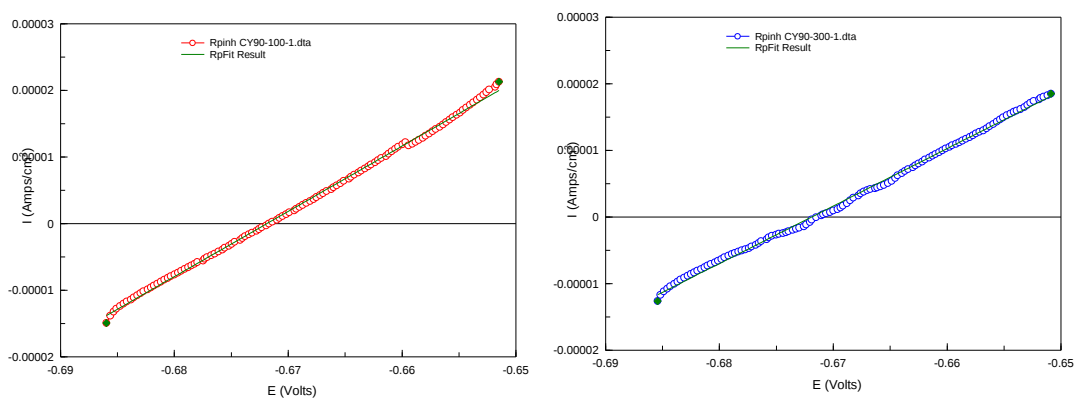


Figura 15: Ensayos de RP para INHIB 4, con 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul).

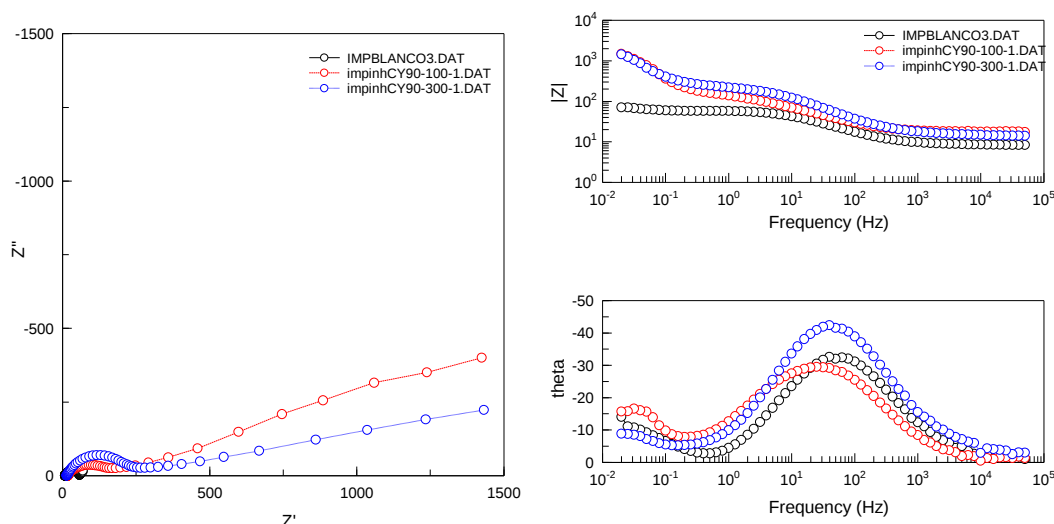


Figura 16: Ensayos de EIS para INHIB 4 para 100 ppm (rojo) y 300 ppm (azul). En negro se presenta el electrolito sin inhibidor (NaCl 10000 ppm).

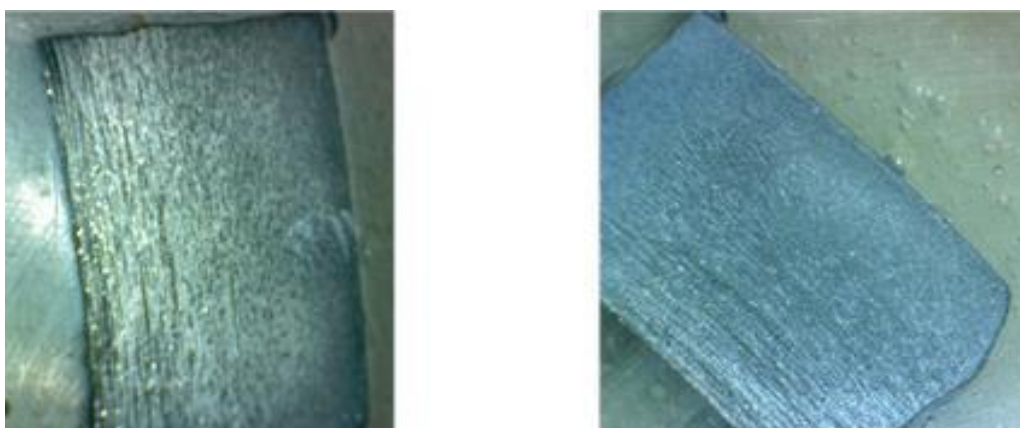


Figura 17: Fotografías de las muestras ensayadas bajo las soluciones de INHIB 4 para 100 ppm (izquierda) 300 ppm (derecha).

2.2.5.5. INHIB 5

La Figura 18 muestra las curvas de polarización anódica y catódica para el inhibidor INHIB 5, bajo dos concentraciones diferentes. En la Figura 19 se presentan los ensayos de resistencia a la polarización (LPR) para las dos concentraciones del inhibidor (la línea verde es el ajuste lineal utilizado para obtener el valor de RP).

En la Figura 20 se presentan los resultados de los ensayos de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) para las dos concentraciones contempladas y su comparación con el blanco. Los resultados se presentan en forma de diagramas de Nyquist (izquierda) y de Bode (derecha).

En la Figura 21 se presentan las fotos de los electrodos de trabajo luego de la secuencia de ensayos.

Los resultados de los ensayos con el inhibidor INHIB 5 son los que presentan los valores más reducidos en densidades de corriente, con respecto a la solución sin inhibir, presentando incidencia tanto en la rama catódica como en la anódica (curvas de polarización). El desplazamiento en densidad se observa para las dos concentraciones de inhibidor ensayadas, sin que la diferencia relativa en densidad sea proporcional a la diferencia relativa en concentración. El mismo efecto se manifiesta en los ensayos de RP y EIS. En estos últimos, se verifican dos efectos, asociados al incremento en la concentración: a) el efecto capacitivo es más

pronunciado; b) se produce un aumento en la pendiente del diagrama de Bode (módulo), probablemente relacionado con una mejor cobertura filmica del producto.

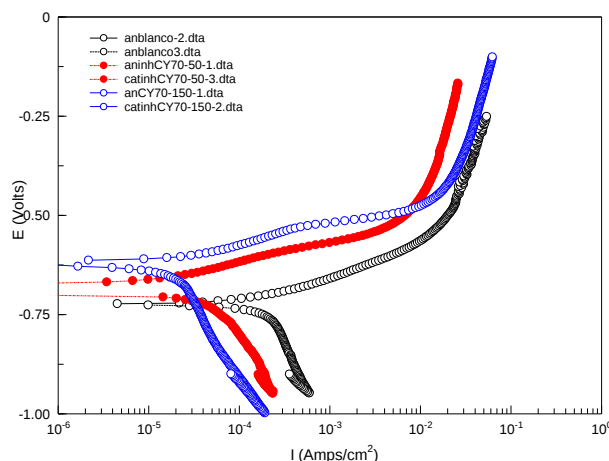


Figura 18: Curvas de polarización anódicas y catódicas para el inhibidor INHIB 5, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul) de inhibidor, y su comparación con el electrolito sin inhibir (negro).

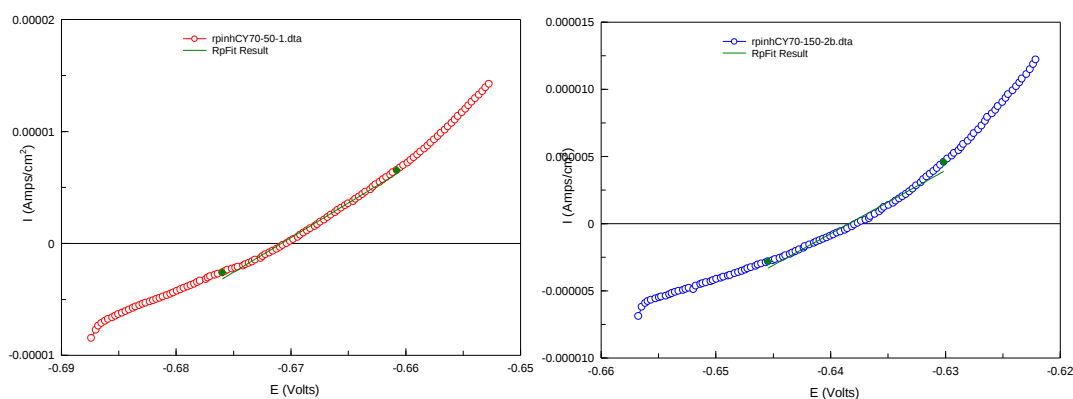


Figura 19: Ensayos de RP para INHIB 5, con 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul).

2.2.6. Resumen Comparativo

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos de resistencia de polarización (RP), obtenidos para las muestras ensayadas en celda convencional de tres electrodos, bajo distintas concentraciones de inhibidor y utilizando, como patrón comparativo base, el “blanco” (NaCl 10000 ppm, sin el agregado de ningún otro componente). Bajo la hipótesis de corrosión generalizada³ y asumiendo control por activación, es posible determinar la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) del material en el medio de estudio, asociada a su velocidad de corrosión de acuerdo con la siguiente expresión⁴:

$$R_p = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta i_{app}} = \frac{\beta_a \beta_c}{2,3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}}$$

donde β_a y β_c son las pendientes de Tafel, anódicas y catódicas.

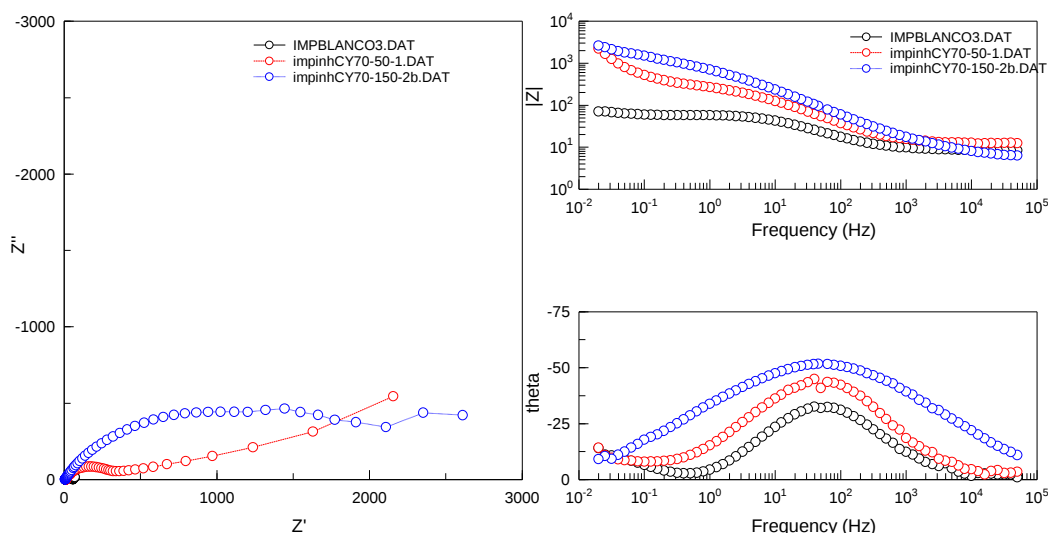


Figura 20: Ensayos de EIS para INHIB 5 para 50 ppm (rojo) y 150 ppm (azul). En negro se presenta el electrolito sin inhibidor (NaCl 10000 ppm).

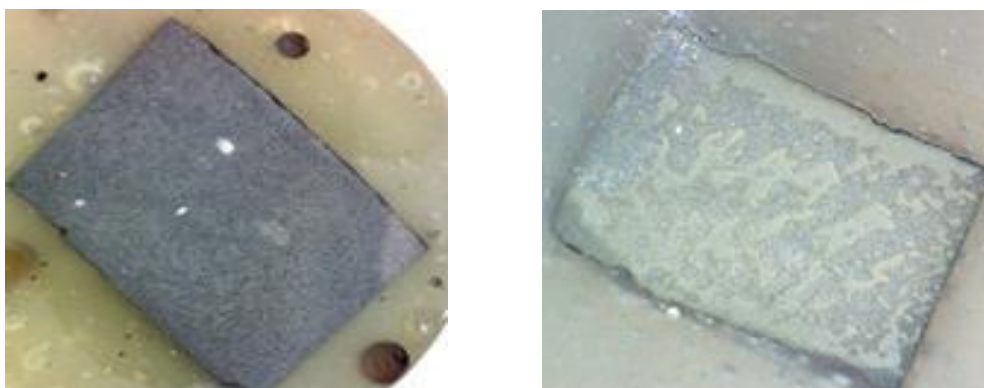


Figura 21: Fotografías de las muestras ensayadas bajo las soluciones de INHIB 5 para 50 ppm (izquierda) 150 ppm (derecha).

Para una mejor interpretación visual de resultados, en la Figura 22 se presentan curvas comparativas de comportamiento, representado por la densidad de corriente y la velocidad de corrosión, para las condiciones de mínima concentración de inhibidor (izquierda) y máxima concentración (derecha). La Figura 23 ilustra el comparativo del factor de reducción en velocidad de corrosión, por acción del inhibidor, para las concentraciones mínima y máxima, lo cual permite inferir lo siguiente:

- Para la condición de mínima concentración, el producto más eficiente es el INHIB 3.
- Para la condición de máxima concentración, el producto más eficiente es el INHIB 5, teniendo en cuenta que el comportamiento del INHIB 3 no varía sensiblemente con respecto a la condición de mínima concentración.

Solución	Concentración de Inhibidor (ppm)	R_p ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	I_{CORR} ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	V_{CORR} (mpy)	E_{CORR} (V vs ECS)
Blanco		104.62 ± 12.7	$3.6 \cdot 10^{-4} \pm 4.8 \cdot 10^{-5}$	1655 ± 224	-0.720 ± 0.02
INHIB 1	100	170.75 ± 31.2	$3.0110^{-4} \pm 7.7 \cdot 10^{-5}$	1478 ± 333	-0.711 ± 0.06
	300	793.70 ± 67.2	$7.52 \cdot 10^{-5} \pm 1.110^{-5}$	346.15 ± 18.2	-0.671 ± 0.08
INHIB 2	50	291.10 ± 58.2	$1.3 \cdot 10^{-4} \pm 4.310^{-5}$	598.1 ± 68.1	-0.701 ± 0.01
	150	1672.85 ± 116.0	$2.2 \cdot 10^{-5} \pm 2 \cdot 10^{-6}$	102.2 ± 10.1	-0.651 ± 0.05
INHIB 3	50	1189.00 ± 102.0	$1.01 \cdot 10^{-5} \pm 3.1 \cdot 10^{-7}$	49.6 ± 11.1	-0.672 ± 0.07
	150	1389.00 ± 106.0	$1.06 \cdot 10^{-5} \pm 1.3 \cdot 10^{-6}$	48.9 ± 5.97	-0.670 ± 0.04
INHIB 4	100	272.47 ± 51.0	$4.5110^{-5} \pm 2.4 \cdot 10^{-5}$	525.2 ± 38.1	-0.705 ± 0.03
	300	880.60 ± 34.8	$3.5 \cdot 10^{-5} \pm 2.1 \cdot 10^{-6}$	177.7 ± 18.1	-0.682 ± 0.04
INHIB 5	50	1183 ± 65.8	$1.13 \cdot 10^{-5} \pm 5 \cdot 10^{-6}$	50.6 ± 9.5	-0.645 ± 0.31
	150	2222.6 ± 95.63	$5.03 \cdot 10^{-6} \pm 1.010^{-6}$	27.7 ± 9.3	-0.634 ± 0.03

Tabla 1: Resultados de los ensayos de resistencia a la polarización, para las soluciones ensayadas y para el blanco (NaCl 10000 ppm).

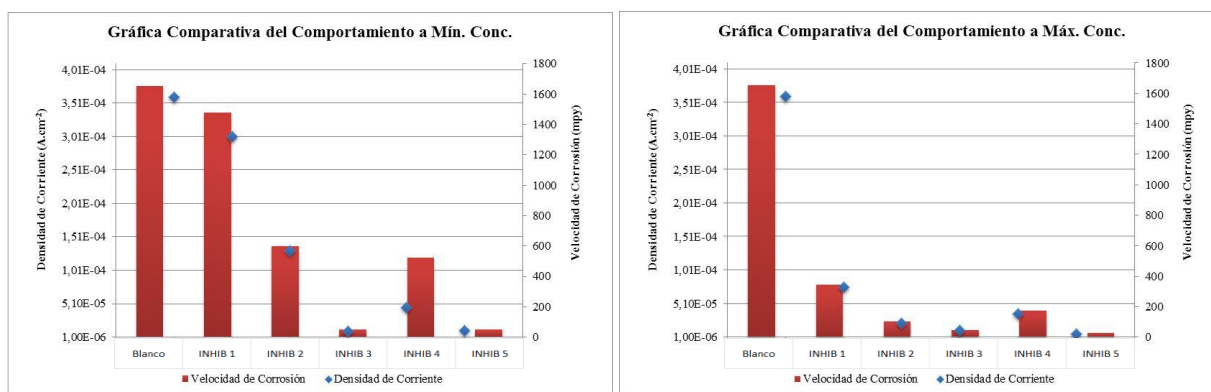


Figura 22. Gráfica comparativa de comportamiento para las condiciones de mínima concentración (izquierda) y máxima concentración (derecha).

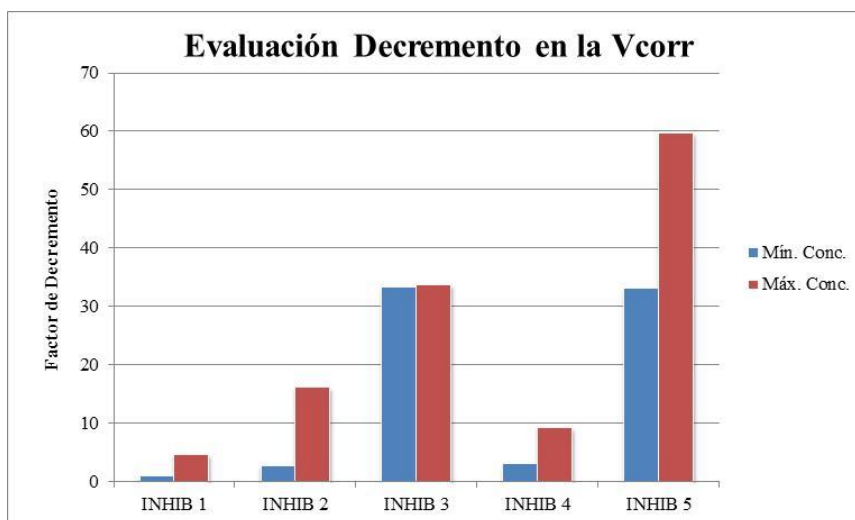


Figura 23. Comparativo en el factor de decremento en la velocidad de corrosión, para las concentraciones mínima y máxima.

3. Conclusiones

3.1. Efecto Inhibitorio

- Si bien todos los inhibidores ensayados mostraron algún efecto con respecto al comportamiento del material expuesto a la solución sin inhibir, los que presentaron mayor incidencia, bajo las condiciones de ensayo, fueron los productos INHIB 5 y INHIB 3. Para la condición de mínima concentración, el

producto más eficiente es el INHIB 3. Para la condición de máxima concentración, el producto más eficiente es el INHIB 5, teniendo en cuenta que el comportamiento del INHIB 3 no varía sensiblemente con respecto a la condición de mínima concentración.

- El inhibidor INHIB 2 presenta densidades de corriente de corrosión comparables a los productos mencionados en el párrafo anterior, pero exclusivamente bajo concentraciones relativamente elevadas, lo cual necesariamente exige el ejercicio de un control riguroso sobre la concentración local, para mantenerla en niveles en los cuales su efecto sea significativo.

3.2. Velocidades de Corrosión

Las velocidades de corrosión obtenidas por medio de los ensayos efectuados son elevadas, si se comparan con los resultados de mediciones correspondientes a sistemas reales bajo inhibición. Considerando que todos los inhibidores de corrosión actúan formando una película sobre el material a proteger, y que este proceso depende de su formulación, de la dosis y del tiempo de residencia, es posible que el tiempo insumido en realizar los ensayos no permita la formación de una película estable sobre el sustrato metálico, que permita que los productos ejerzan su pleno potencial inhibitorio. No obstante, es evidente que todos los ensayos mostraron evidencia de la capacidad mitigativa de los productos analizados, verificando distintos grados de disminución en la velocidad de corrosión (entre uno o y dos órdenes de magnitud, comparando con el electrolito sin inhibir), dependiendo del producto y de la concentración, manteniendo las variables restantes como constantes.

3.3. Comportamiento Superficial

Tanto los ensayos de impedancia como la inspección visual efectuada con posterioridad a la inmersión de los electrodos indican que los niveles de disolución activa observados son consistentes con las velocidades instantáneas de corrosión y con los parámetros representativos de la película superficial protectora.

3.4. Recomendaciones

3.4.1. Verificación de los Productos Ensayados

Con el objetivo de asegurar la reproducibilidad de los inhibidores a utilizar en yacimiento, es conveniente llevar a cabo un ejercicio de ensayos electroquímicos simples (velocidad de corrosión), con frecuencia mínima anual y en modalidad “spot”.

3.4.2. Uso en Instalaciones de Campo

Teniendo en cuenta la dependencia que presenta la eficiencia de tratamiento con la dosis y con los tiempos de residencia, es recomendable que cualquiera de los productos ensayados en laboratorio sea evaluado en campo, por medio de un período de prueba en el cual sea posible ajustar el caudal de dosificación para cumplir con la máxima velocidad de corrosión admisible, sin incurrir en sobredosis.

Conclusion final

Es sabido que el uso de los inhibidores en campo requiere el estudio de tiempos de residencia y formación de películas superficiales lo que requiere estudios in situ en tiempo real. Los estudios en laboratorio son una herramienta eficaz y económica que permiten realizar ensayos en forma comparativa de diversos productos con diferentes concentraciones, logrando disminuir el espectro de variables a probar en la operación en campo, con sensible disminución de los tiempos requeridos.

4. Bibliografía y Referencias

1. ZPLOT for Windows, Electrochemical Impedance Software Operating Manual. Part I, Scribner Associates, Inc. Southern Pines, NC (1998).
2. Máximo contenido de cloruro, de acuerdo a los registros procesados a la fecha.
3. Electrochemical Polarization: I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves by M. Stern and A. L. Geary, Journal of the Electrochemical Society, Vol. 104, No. 1, 56-63, 1957.

5. CV Adolfo Pellicano

Adolfo Pellicano.

Ingeniero químico. Universidad Nacional de Mar del Plata (1989).

Realizo estudios de posgrado en la División Corrosión del INTEMA (Instituto en Ciencia y Tecnología de Materiales) 1991- 1995. Pasante de British Council- Fundación Antorchas en la Universidad de Liverpool (Reino Unido) con la supervisión del Dr. David Schifffrin.

Presidente de SINTEC SA. Especialista en corrosión, protección anticorrosiva e integridad.

Es autor de numerosos artículos técnicos y presentaciones en congresos nacionales e internacionales.

