

DAÑO POR DESGASTE POR DESLIZAMIENTO Y CORROSIÓN ENTRE ACOPLER DE VARILLAS DE POZO Y TUBERÍA DE PRODUCCIÓN

RESUMEN

Se evaluó el desgaste por deslizamiento de un API J55 con y sin ambiente de CO₂, con acoples convencionales de spray metal, y materiales poliméricos usados en centralizadores, además, se evaluó la efectividad de un inhibidor de corrosión.

Los resultados mostraron que la pérdida de material es más severa cuando se presentaron ambas condiciones (corrosión más deslizamiento); el uso de acoples con materiales duros protegió al acople pero incrementó el desgaste en la tubería. El uso de centralizadores en materiales poliméricos protegió la tubería, pero su vida útil fue corta; el efecto del inhibidor de corrosión se disminuyó debido a que la película protectora fue afectada por el rozamiento.

PALABRAS CLAVES: Acoples, centralizadores, tubing, spray metal, inhibidor, dióxido de carbono, deslizamiento y corrosión.

ABSTRACT

The waste in a tubing J55 in a non-corrosive atmosphere and corrosive with CO₂, was evaluated against coupons of conventional coupling with spray metal, and material polymeric used as centralizers. Also, the effectiveness of corrosion inhibitor was evaluated. The results showed that the material loss is more severe when both conditions are presented (sliding and corrosion): the use of coupling with hard materials, it protected itself but increased the waste in the tube; the use of polymeric centralizer protected the pipe, but its useful life was short; the protective effect of the inhibitor of corrosion was decreased due to the inhibition film was affected by the friction.

KEYWORDS: Coupling, sliding, tubing, spray metal, inhibitor, carbon dioxide.

1. INTRODUCCIÓN

Algunas causas de desgaste entre tuberías de producción (tubing) y los acoples de varillas, en sistemas de bombeo mecánico y bombeo por cavidades progresivas, se deben al deslizamiento entre ellos debido a la desviación en la verticalidad del pozo y a la presencia de fluidos corrosivos tales como agua, gases ácidos como el ácido carbónico (CO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S) [1-3].

Respecto a la verticalidad del pozo, debido al movimiento reciprocante (Bombeo mecánico) y al movimiento rotacional (Bombeo por cavidades progresivas), se genera un fenómeno de desgaste por fricción excesiva entre los acoples de las varillas de succión y la tubería de producción, mientras que los fluidos corrosivos del reservorio ocasionan el fenómeno de corrosión metálica en los dos elementos [4-6]. Es importante resaltar que durante el proceso de desgaste, los productos de corrosión que son generados por el efecto corrosivo de los fluidos y que pueden formar una capa protectora, son removidos continuamente, aumentando la velocidad de pérdida de material. Estos productos de corrosión pueden incluso, dependiendo de su estructura química, causar un efecto abrasivo

incrementando la severidad del daño [7]. Con el fin de minimizar el efecto corrosivo, se está implementando la inyección de inhibidores de corrosión (tipo fílmico) en el fondo del pozo; y el efecto de desgaste mediante el empleo de centralizadores poliméricos y rotadores de varillas. Sin embargo, la intensidad del daño del fenómeno, en conjunto, dependerá del ambiente de trabajo y del nivel de protección que tenga cada pieza, esto es, tipo de elementos aleantes presentes, diseño (forma, tratamientos térmicos, recubrimientos), metales vecinos, propiedades mecánicas, efectividad del inhibidor de corrosión y lubricación. Este último factor es relevante en el daño causado por el fenómeno sinérgico de corrosión-desgaste y puede ser aportado por el porcentaje de crudo presente en la mezcla crudo-agua del pozo [8].

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del daño de desgaste por deslizamiento y el efecto sinérgico de dicho desgaste y la corrosión, y la efectividad de aplicar inhibidores fílmicos de corrosión. El documento presenta el equipo que se diseñó para simular el mecanismo de daño por desgaste por deslizamiento y corrosión, y los resultados obtenidos a partir de la

DARÍO YESID PEÑA B.

Ingeniero Metalúrgico, Ph.D
Profesor Asistente. GTUIS
Universidad Industrial de Santander
dypena@uis.edu.co

ALEXANDER MARTÍNEZ R.

Ingeniero Mecánico, M.Sc.
Instituto Colombiano del Petróleo.
alexander.martinez@ecopetrol.com.co

FREDDY CUADRADO.

Ingeniero Metalúrgico.
freddy_cuadrado@hotmail.com

WILLIAM PRADA.

Ingeniero Metalúrgico.
guakitas@gmail.com

severidad de estos mecanismos encontrados, y el comportamiento de algunos materiales que están siendo utilizados como alternativas de control ó minimización del fenómeno de corrosión-desgaste.

2. CONTENIDO

2.1 Experimental

Para el desarrollo de las pruebas, se rediseñó una autoclave para simular las condiciones de deslizamiento, ver figura 1. El dispositivo permite que dos pines (simulando los acoples), roten sobre un anillo estático (simulando el tubing), generando las condiciones de rozamiento. Sobre los anillos se aplica un peso muerto (plomo), el cual simula la fuerza normal de contacto entre los pines (acoples) y el anillo (tubing). La autoclave permite confinar un medio corrosivo y simular las condiciones de presión y temperatura del fondo de pozo. La carga se determinó de acuerdo con los resultados de las pruebas preliminares y mediante cálculos de la carga normal generada entre el acople y la tubería, con un ángulo de desviación severo correspondiente a 10° (dog leg severity). El valor obtenido fue de 7 libras, pero con el ánimo de acelerar los ensayos se utilizó 8,5 libras en las pruebas de laboratorio. La velocidad de rotación de los pines en cada prueba, se calculó mediante una conversión de la velocidad real del acople en el pozo, durante el ciclo de bombeo, a un valor equivalente en revoluciones por minuto (rpm), relacionado con el perímetro de los anillos de la tubería, este valor correspondió a 89,88 rpm \approx 90 rpm. Los experimentos de cada etapa se realizaron por 5 días.

En la selección de la velocidad de rotación de los pines se tuvo en cuenta la distancia recorrida por el acople sobre el tubing a 12 strokes por minuto, con un recorrido de 140 pulgadas, lo cual es similar a la distancia recorrida por el pin sobre el anillo a 90 rpm. La velocidad de rotación del eje y la temperatura del sistema se controlaron mediante el circuito electrónico de la autoclave dinámico y la presión interna del montaje mediante la disposición de entradas y salidas para gases ubicadas en la tapa de la vasija de la autoclave.

Los pines (simulando los acoples), tuvieron una superficie de contacto plana de 0.02 in^2 (0.20 cm^2), la dimensión del anillo (simulando el tubing) fue de OD 4,5 in ($114,3 \text{ mm}_2$), altura $0,786 \text{ in}$ (20 mm_2) y $5/16'' \text{ in}$ ($7,937 \text{ mm}_2$) de espesor, los anillos se maquinaron de una sección de tubing J55, 4.5 OD.

Todos los materiales se probaron bajo ensayos de dureza, escala Rockwell A para los acoples y la tubería, aunque también se tomaron valores de dureza de campo para la tubería en escala Brinell y escala Vickers para el recubrimiento, cumpliendo todos con la especificación

API 11B (Specification for Sucker Rods).

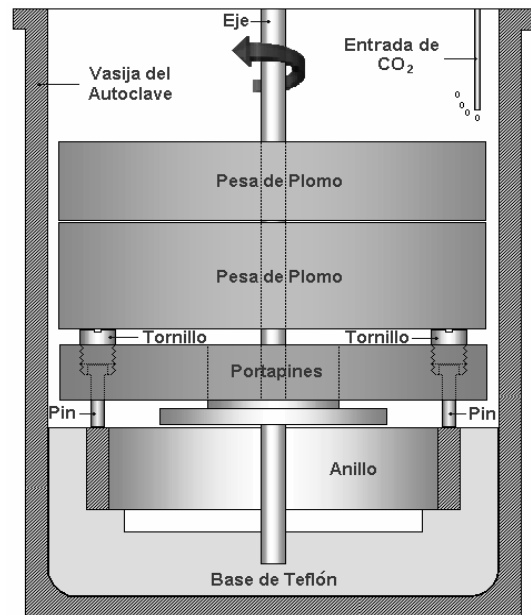


Figura 1. Diseño y montaje del dispositivo

2.2. Procedimiento Experimental

Etapa I. Encaminada a medir la pérdida de material, tanto en las probetas de acople como de la tubería, debido solamente al desgaste por deslizamiento. El medio que se empleó fue 1 litro de agua destilada tipo IV, temperatura 50°C y atmósfera de N_2 .

Etapa II. Enfocada a determinar la pérdida de material, tanto en el acople como en la tubería, ocasionada por el fenómeno de corrosión y desgaste de manera sinérgica. El medio que se empleó fue 1 litro de agua destilada tipo IV, burbujeada durante 5 horas con CO_2 , 50°C , 1000 psi.

Etapa III. Encaminada a determinar la pérdida de material ocasionada por el fenómeno de corrosión y desgaste, bajo la acción de un inhibidor de corrosión. El medio empleado fue agua destilada tipo IV burbujeada con CO_2 durante 5 horas, 50°C , 1000 psi, 1 litro de solución y 53 microlitros de un inhibidor tipo fílmico (Amina cuaternaria).

Los materiales empleados en las cuatro etapas fueron los siguientes:

- **Materiales de acoples.** Los pines se fabricaron de cuatro tipos diferentes de materiales comúnmente utilizados:

- Acero AISI SAE 8630 con microestructura de ferrita y perlita.(F-P) Ver Tabla 1.
- Acero AISI SAE 8630 con microestructura

martensita. (M)

- Pin con capa de spray metal (SM). Se realizó un análisis de composición química puntual sobre la capa por WDS acoplado a un microscopio de barrido (SEM), observándose que esta conformada principalmente por níquel, y en menor proporción cromo, silicio y carbono.
- Material polimérico PPA, los pines se fabricaron a partir de un centralizador comercial
- **Material del tubing.** La Tabla 1 presenta la composición química del material del tubing.
- **Dureza de los materiales:** La Tabla 2 presenta los valores de dureza de los cuatro materiales de los pines y del tubing.

2.3 Resultados y Discusión

La Figura 2 presenta los resultados de pérdida de material, obtenido en la evaluación de los cuatro materiales de los pines, bajo las condiciones establecidas para las etapas I, II y III. En el eje vertical se presenta el desgaste del pin, tomando como referencia la disminución de la longitud inicial con relación al área expuesta.

La Figura 3 presenta los resultados obtenidos de pérdida de material en el tubing (anillo), ocasionado por los cuatro materiales de los pines en las etapas I, II y III. El eje vertical representa la profundidad de la entalla inducida en el anillo por cada uno de los pines. Todas las pruebas se repitieron con el fin de verificar la repetibilidad de los resultados.

	Acople 8630	Tubing J55
C	0.326	0.475
Mn	0.885	0.799
P	0.000	0.01
S	0.030	0.007
Si	0.239	0.189
Ní	0.526	0.084
Cr	0.463	0.799
Mo	0.194	0.052
V	0.002	--
Al	0.035	--
Cu	--	0.181
Ti	0.002	--
Sn	0.008	--
Fe	97.1	98.04

Tabla 1. Composición química acero AISI SAE 8630 y del tubing.

Material	Dureza
Acero AISI SAE 8630, ferrita-perlita.	58,84 HRA*
Acero AISI SAE 8630, martensita revenida.	60,28 HRA
Acero API grado J55.	53,28 HRA
Capa de Spray Metal.	677 Vickers
Centralizador, polimérico	92 Shore

*HRA: dureza Rockwell en escala A.

Tabla 2. Durezas de los materiales a ensayar.

Etapas I. Desgaste por deslizamiento: En la Figura 2, tomando como referencia el desgaste observado en el acople ferrita perlita, se observa que el acople de martensita presentó un desgaste 2.5 veces mayor, el pin de SM presentó un desgaste despreciable y el pin de polímero presentó un desgaste seis veces mayor.

Haciendo un análisis similar con la Figura 3, el desgaste ocasionado en la tubería J55 por el pin de martensita fue 3.8 veces mayor, la capa de SM generó un daño diez veces mayor y el material polimérico no generó daño sobre el tubing.

Comparando el daño generado con la dureza de los pines evaluados, se identifica que el pin de spray metal no sufrió daño alguno debido a su alta dureza, sin embargo el tubing presentó la mayor pérdida de material, la morfología del daño del tubing se puede observar en la Figura 4. El pin polimérico presenta una muy baja dureza comparado con el tubing, lo cual hace que no se produzca pérdida de material en el tubing. Sin embargo, la durabilidad de los pines poliméricos fue bastante baja.

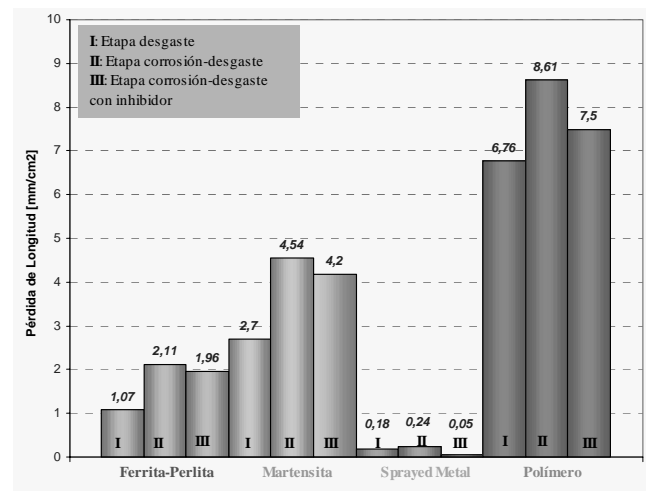


Figura 2. Pérdida de longitud en los pines (acoples y centralizador).

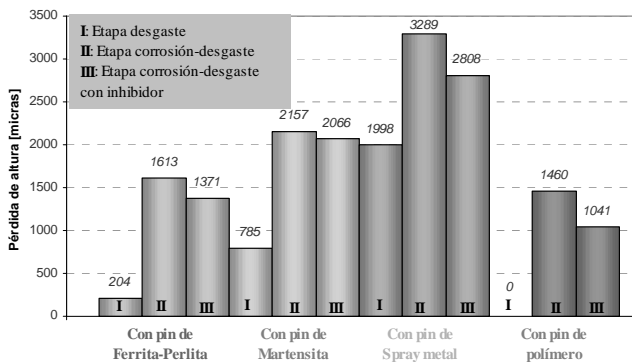


Figura 3. Pérdida de altura en los anillos (Tubing).

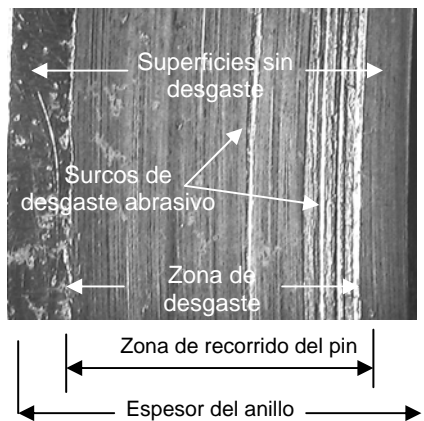


Figura 4. Daño en el anillo debido al contacto con el pin de Spray Metal. Etapa de desgaste. 10X.

Al comparar el comportamiento entre los pines de acople de ferrita-perlita y los pines de martensita revenida, se observó que esta última microestructura presentó mayor desgaste, éste comportamiento se debe a que la microestructura de martensita revenida posee una menor resistencia al desgaste, lo que permite que durante el proceso de rozamiento se desprenda una gran cantidad de material de pin de martensita y anillo, ocasionando nuevamente la aparición del desgaste abrasivo, permitiendo la formación de una superficie de picos y valles que van a influir directamente en la morfología del desgaste tanto del pin como del anillo.

La microestructura de ferrita-perlita sufrió un desgaste por deslizamiento menos severo en el anillo ya que la ferrita posee una mejor ductilidad y la perlita aporta un efecto lubricante al sistema tribológico. Ver Figura 5.

Etapa II Corrosión - Desgaste: Tomando como referencia el comportamiento en desgaste por deslizamiento (Fase I), de los materiales evaluados, se tiene:

- El desgaste presentado en el pin de ferrita perlita se incrementó en dos veces, lo mismo sucedió con el pin de martensita (ver figura 2).

- El pin de Spray Metal presentó una gran resistencia al fenómeno de corrosión-desgaste, ésta se le atribuye a la presencia de cromo y níquel.
- El pin de polímero presentó un incremento del 27%, comparado al desgaste atribuido sólo al rozamiento. Comparado con el pin de ferrita perlita, el pin polimérico se desgastó cuatro veces más.
- Es importante resaltar que la periferia de los pines de martensita presentaron un daño mayor por corrosión que los pines de ferrita perlita. Ver Figura 6.

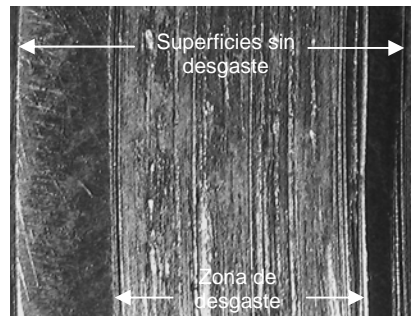


Figura 5. Morfología de la superficie de desgaste del anillo ocasionada por el pin de martensita revenida en la etapa de desgaste. 10X



Figura 6. Superficie transversal del pin de martensita revenida, 10X.

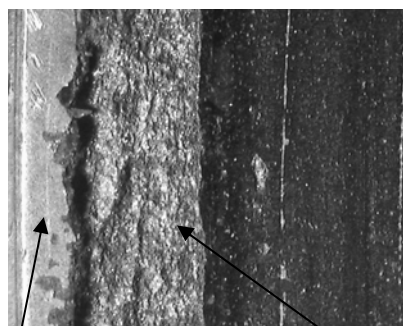
El desgaste observado en los anillos presentó un incremento bien representativo. En el caso de los pines de acero, el desgaste se incrementó más de siete veces. Comportamiento similar se obtuvo con los pines de spray metal y polímero. Se observa que el rozamiento elimina los depósitos de corrosión, dejando la superficie desgastada del anillo nuevamente expuesta al ambiente corrosivo por CO₂. La pérdida de material en el anillo aumentó debido a que la capa protectora de siderita (FeCO₃), formada sobre la superficie del anillo, fue removida por el pin de spray metal, dejando zonas vulnerables al ataque de la corrosión por CO₂. Es importante resaltar, que la capa de siderita fue removida por todos los pines, incluyendo el pin de polímero, es por ésto, que la pérdida de material en el anillo, en la etapa de corrosión-desgaste, fue mayor que en las otras etapas.

Etapa III Corrosión-desgaste más inhibidor:

Comparando el comportamiento de estas pruebas con lo observado en la pruebas de la Etapa I, el desgaste presentado en los pines de acero 8630 y el material polimérico fue muy alto, aunque un poco menor que el observado en la Etapa II. El desgaste del pin de spray metal también fue muy bajo.

Se identificó que el efecto protector del inhibidor filmico fue muy bajo. El rozamiento entre los pines y el tubing remueve la capa del inhibidor filmico constantemente, debido a que no hay tiempo para la recuperación de la capa protectora.

La buena eficiencia protectora del inhibidor filmico se verificó sobre la superficie del anillo que no tuvo contacto con los pines, la cual no presentó desgaste por corrosión (Ver Figura 7), lo mismo sucedió con el cuerpo de los pines de acero expuestos al fluido corrosivo.



Superficie protegida por el inhibidor Zona deteriorada por corrosión-desgaste

Figura 7. Efecto del inhibidor sobre la superficie del anillo de acero 8630. 10X.

El fenómeno de corrosión, sobre la superficie de los pines de ferrita-perlita y martensita revenida, disminuyó en comparación con la etapa anterior (corrosión-desgaste), debido al efecto protector del inhibidor, como se muestra en la Figura 8 (a) y (b), allí también se observa, que la protección del inhibidor no fue tan efectiva como para contrarrestar el efecto corrosivo del ambiente acuoso saturado con CO₂ sobre los pines de martensita revenida, los cuales presentaron un picado severo.

Las Figuras 9 (a) y (b) muestran la morfología de las superficies transversales del pin de polímero y el anillo durante la etapa de corrosión-desgaste con inhibidor.

Sobre la superficie del anillo (Figura 9b), se observan dos zonas claramente definidas. La primera zona muestra un ataque por corrosión, ocasionado por la remoción de la película de inhibidor por parte del pin de polímero, la cual quedó expuesta al ambiente corrosivo. La segunda zona muestra una superficie más pulida, sin la presencia de zonas corroídas, debido a la protección que proporcionó la película de inhibidor, que no fue removida por el pin de polímero. Esto demuestra que el pin de polímero, a pesar de no causar daño en la tubería por

fricción, remueve la película de inhibidor junto con los productos de corrosión, afectando directamente su resistencia a la corrosión.

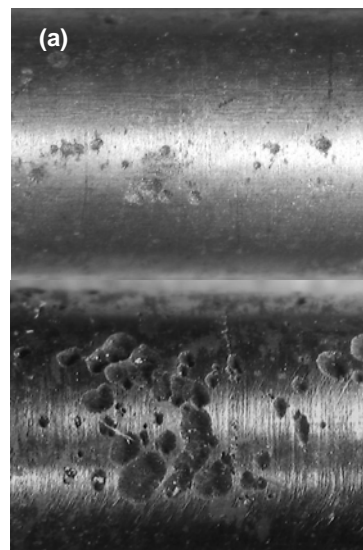


Figura 8. Morfología de las superficies de los pines que sufrieron ataque por corrosión en la etapa de corrosión-desgaste con inhibidor. (a) Pin de ferrita-perlita, 10X. (b) Pin de martensita revenida, 10X.

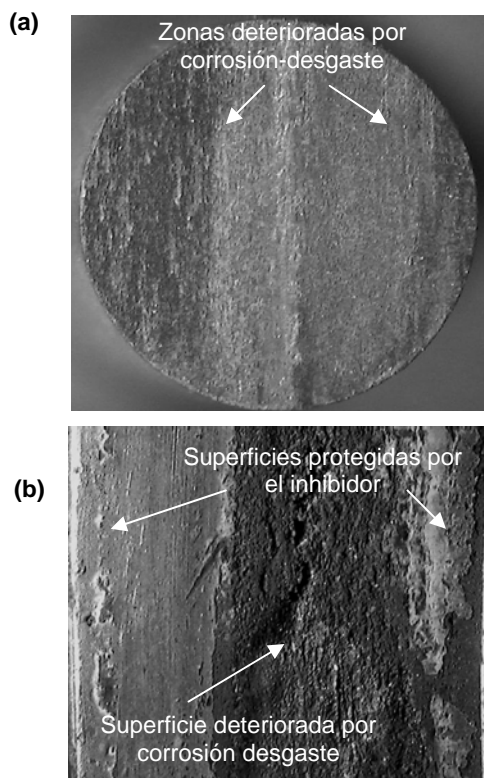


Figura 9. Morfología de las superficies del pin de polímero y anillo en la etapa de corrosión-desgaste. (a) Superficie transversal del pin polímero, 10X. (b) Morfología del anillo de tubería J55, 10X.

El material de los centralizadores presentó gran cantidad de porosidades (picado) como se observa en la Figura 10. Estas discontinuidades afectan la resistencia al desgaste del polímero, debido a que el área efectiva de contacto disminuye y aumenta el esfuerzo efectivo entre el pin y el anillo.

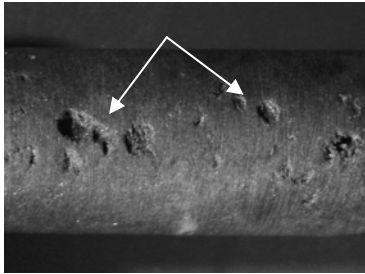


Figura 10. Presencia de porosidades en el material de centralizador, 75X.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Debido a que la microestructura de martensita revenida es frágil, la morfología de la superficie de desgaste en estos acoples, presentó alta rugosidad, ocasionando un mayor efecto de desgaste en la tubería. Además, la microestructura de martensita es metaestable y posee una alta energía, permitiendo más fácilmente el ataque por corrosión, por lo que tiene una baja posibilidad de utilización en pozos con condiciones ambientales corrosivas y de contacto metal-metal.

El centralizador de polímero presentó un óptimo comportamiento, ya que no causa ningún tipo de daño mecánico a la tubería, aunque debido a su baja resistencia al desgaste, no tiene una vida útil prolongada, actuando como material de sacrificio. Se debe tener cuidado con su utilización ya que permite la remoción de la película de inhibidor, dejando la superficie del anillo expuesta a un nuevo ataque por corrosión.

El mejor comportamiento lo mostraron los pines de microestructura ferrítico-perlítica en todas las etapas, ya que presentaron el menor desgaste sobre la tubería, debido a que los granos de ferrita son dúctiles y los granos de perlita ejercen una acción lubricante por el carbono presente en ella.

La eficiencia de protección del inhibidor fílmico es seriamente reducida, debido a que la capa de inhibidor es removida por las superficies en contacto. En pozos donde el inhibidor se aplica por baches semanales o quincenales su efecto protector sería nulo.

El pin de martensita revenida presentó un ataque severo, que penetró un gran porcentaje del cuerpo del pin, evidenciando la baja resistencia de esta microestructura a la corrosión por CO₂, mientras que el ataque sobre el pin de ferrita-perlita fue menos agresivo, debido a que se presenta de manera selectiva sobre los granos de ferrita,

dejando intactos los granos de perlita. Esto se debe a la corrosión galvánica, en la cual la fase activa (Ferrita), se corroe como el ánodo preferencial y la perlita (Fase pasiva) actúa como cátodo.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a ECOPETROL S.A. Superintendencia de Operaciones de Mares, campo La Cira por hacer posible la financiación de este trabajo de investigación, al Grupo de Tribología y Superficies de la Universidad Industrial de Santander – GTUIS y al Grupo de Investigaciones en Corrosión – GIC.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] HEDAYAT, A., YANNACOPOULOS, S., POSTLETWAITE, J. Wear and CO₂ corrosion of steel couplings and tubing in heavy oil screw-pump wells, *Wear*, 209, 1997.
- [2] HEDAYAT, A., YANNACOPOULOS, S., POSTLETWAITE, J. Conjoint action of CO₂ corrosion and reciprocating sliding wear on plain carbon steel. Part II – Electrochemical studies, *Corrosion*, vol. 48, No. 12, 1992.
- [3] NUNCIRA, H., PÉREZ, J. Efecto de la microestructura sobre la corrosión de aceros en soluciones acuosas conteniendo CO₂, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2000.
- [4] HUMPHREYS, K., MATTHEWS, C. Reciprocating-sliding wear of sucker rods and production tubing in deviated oil wells, Conferencia Internacional sobre desgaste de materiales, Denver, Centre for Frontier Engineering Research, p 20, 1989.
- [5] McCASLIN, K. P. A study of the methods of preventing rod wear tubing leaks in sucker rod pumping well, Society of Petroleum Engineers, 1987.
- [6] SCOTT, W., JAMAYO DE, V. Measured rod coupling on tubing wear, Southwestern petroleum short course.
- [7] COLLINS, A.D. Failure of materials in mechanical design. Estados Unidos of America. 1981. p. 584.
- [8] FONSECA, J. Desarrollo de una técnica experimental para la evaluación hidrodinámica de inhibidores de corrosión del acero API-5Lb en presencia de dispersiones aceite-agua saturadas con CO₂. UIS. Bucaramanga, 1999.