



Por **Pablo Funes y Federico Cámara** (Metalmecánica)
y **Eduardo J. Dottore** (PanAmerican Energy)

Este trabajo fue seleccionado de las 20° Jornadas Técnicas para Incrementar la Eficiencia y la Sustentabilidad en Yacimientos Maduros, realizadas en Comodoro Rivadavia (Agosto 2017) por la Seccional Sur del IAPG.

La Unidad de Gestión del Golfo San Jorge (UGGSJ) de Pan American Energy (PAE) se encuentra ubicada sobre la ruta nacional N° 26, aproximadamente a 70 kilómetros de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Abarca 3400 km² de extensión e incluye varios distritos en el sur de la provincia de Chubut y el norte de la provincia de Santa Cruz (Figura 1).

El sitio comenzó a explotarse en 1957 por YPF, a partir de 1958 por Amoco Corp y, desde 1997, el yacimiento está operado por PAE. A fines de los noventa, Cerro Dragón ya era un yacimiento maduro por lo que comenzó a emplearse la técnica de recuperación secundaria.

En 2014 comenzaron a presentarse fallas prematuras en el cuerpo de las varillas en pozos explotados con

“Nuevas tecnologías en varillas de bombeo para ambientes agresivos”

Los proyectos de recuperación secundaria generan un aumento en el corte de agua del fluido producido en pozos maduros, lo cual implica la utilización de bombas mecánicas más grandes y éstas, mayores cargas a la sarta de varillas y mayor corrosión. En este trabajo se muestra la evolución favorable al utilizar un nuevo material en las varillas para ambientes agresivos.

bombeo mecánico. Primero fue el distrito 9, seguido por los distritos 3 y 5.

Las fallas presentaban la característica típica de rotura por fatiga (Figura 2). La superficie de fractura se desarrollaba en forma perpendicular al eje de la pieza, mostrando zonas de propagación estable, con superficies planas y lisas. El avance del frente de fisura era estable hasta distancias que oscilaban aproximadamente entre un 45% y un 55% de la sección resistente, para luego dar lugar a zonas de propagación inestable, con superficies irregulares y rugosas, que en su fase final formaban labios a unos 45 grados de inclinación con respecto del eje de la pieza, como resultado de un fuerte cambio en la dirección de la tensión principal, debido a la reducción de la sección resistente. En la mayoría de los casos no fue factible determinar a simple vista la causa del inicio de la falla (por ejemplo golpe, *pitting*, inclusión, etc.).

Se verificó que la falla más frecuente era en zonas cercanas al extre-

mo de la varilla dentro del primer pie respecto del frente (Figura 3).

Este hecho nos hizo pensar que la falla podría derivar de un posible defecto de manufactura. El recalque de

los extremos de las varillas se efectúa a alta temperatura llevando al material al rojo blanco. Esto motiva que en la zona del recalque haya una metalografía (microcomponentes, estructura, tama-

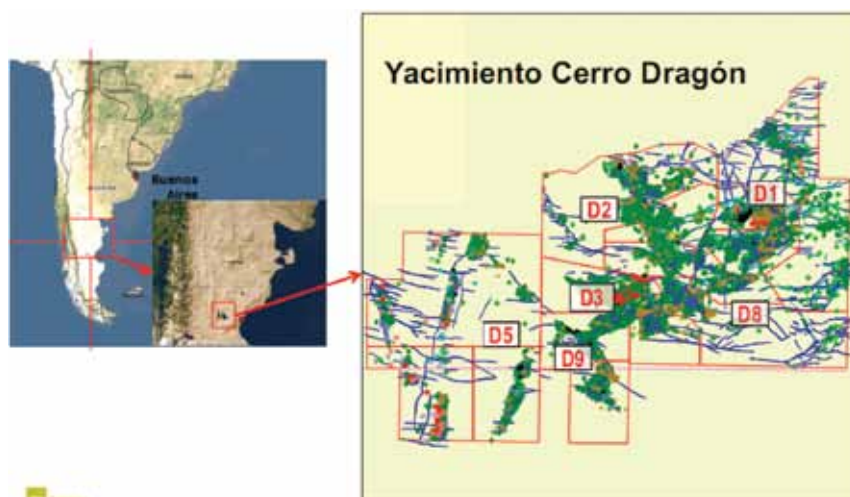


Figura 1. Ubicación del Yacimiento Cerro Dragón.



Figura 2. Superficies de fracturas.

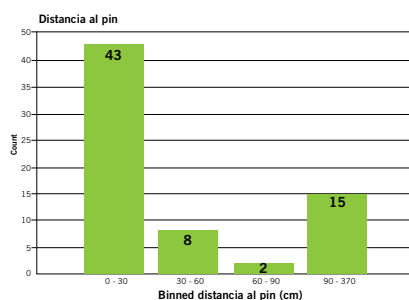


Figura 3. Ubicación de fallas en varillas de bombeo.

ño de grano, dureza, etc.) diferente a la del cuerpo de la varilla y al de la transición entre ambas zonas. De no haberse hecho el tratamiento térmico de homogeneización de todo el material de la varilla, las distintas estructuras metalográficas podrían ser la causa principal del inicio de la falla probablemente en la zona de la estructura de transición.

Revisando las estadísticas en cada uno de los distritos comprometidos, se confirmó que la mayoría de las roturas se presentaron dentro de los primeros 30 centímetros de la varilla fallada (Figura 4).

Asimismo, se verificó que las fallas eran más frecuentes en varillas de 1" y de 7/8" con pin de 1", es decir, en las varillas más solicitadas de la sarta.



Figuras 4 y 5. Porcentajes de ubicación de taller en varillas de bombeo.

También confirmamos que la mayoría de las piezas eran nuevas.

Revisando las estadísticas de cada yacimiento de los distintos distritos involucrados, nos centramos en aquellos pozos que mostraban una frecuencia de intervención por pesca superior a dos veces al año, es decir un "run life" histórico inferior a 180 días.

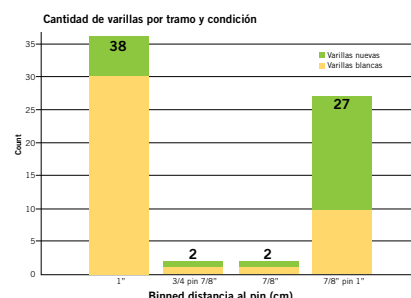
Analizando al microscopio las zonas de fractura de las varillas falladas en esos pozos críticos, pudimos visualizar el punto de iniciación de la falla. Con una amplificación de 10 veces a 500 veces del tamaño de la muestra fue posible determinar el inicio o nucleación superficial de la falla.

Se enviaron las piezas falladas a laboratorios externos para tratar de determinar la causa de las roturas. Se solicitó la determinación de la estructura metalográfica, componentes, tamaño de grano, dureza y detección de inclusiones, todo esto en el pin, a 30 centímetros y a 60 centímetros del extremo de la varilla, con el claro objetivo de confirmar (o descartar) que las fallas correspondían a un defecto de fabricación.

Los resultados de los laboratorios fueron concluyentes. En todos los casos analizados se verificó un ataque corrosivo y rotura por fatiga en el cuerpo iniciada en pittings de corrosión por SH_2 .

La microestructura encontrada en todos los puntos de las varillas analizadas fue bainítica con durezas de 29/30 HRC con una limpieza inclusionaria del acero muy buena, lo que nos indujo a descartar de plano que las fallas correspondieran a un defecto de fabricación.

Ante las evidencias confirmadas, se nos presentó la posibilidad de ensayar un acero desarrollado específicamente para soportar ambientes agresivos inducidos a fallas por co-



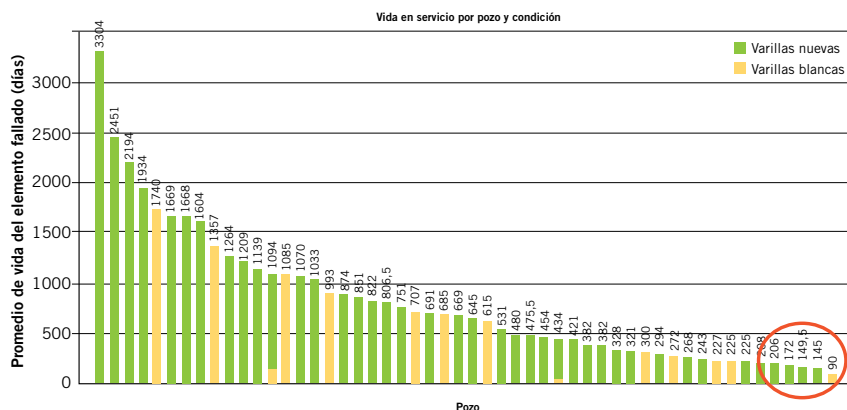


Figura 6. Vida en servicio de varillas de bombeo.

rosión-fatiga. No se trata de un acero resistente a la corrosión, sino al fenómeno compuesto de corrosión-fatiga. Es decir, se podrán generar *pittings* de corrosión en la superficie de las varillas, pero el avance de la fractura por fatiga será mucho mas lento que en los aceros comerciales disponibles. Ello se debe fundamentalmente a la tenacidad del nuevo material.

Si analizamos las propiedades mecánicas del nuevo acero no veremos gran diferencia respecto de las de un acero tradicional, excepto por la resistencia al impacto. Un ensayo Charpy

con entalla en V a 20 °C efectuado en un acero grado "D Alloy" da como resultado una resistencia al impacto entre 9 y 12 Joules, mientras que este nuevo acero soporta 180 Joules (valor típico de ensayos). Esta tenacidad adicional es la que determina que el avance de la fractura por fatiga sea mucho más lento que en los aceros tradicionales.

Se decidió entonces efectuar ensayos con este nuevo material en aquellos pozos en los que se verificaban fallas por corrosión fatiga con una frecuencia de intervención por pesca

superior a dos veces al año, es decir, con un "run life" histórico inferior a 180 días. Se definió que los ensayos serían considerados exitosos si por lo menos se duplicaba la vida en servicio de la sarta. Los resultados se presentan a continuación.

En el Pozo 1 se tenía antecedentes de fallas por corrosión fatiga con un promedio histórico de duración de 138 días. Se decidió bajar sarta completa con el nuevo material con el objetivo de que el ensayo durara por lo menos 276 días. La respuesta de la secundaria llegó notoriamente, con lo que a los 320 días de iniciado el ensayo se adecuó el pozo al sistema electrosomergible, es decir, que se superó el "run life" histórico en 2,32 veces (la sarta con el material nuevo fue reinstalado en otro pozo fuera del protocolo de ensayos y continúa trabajando correctamente).

En el Pozo 2 las fallas por corrosión fatiga se producían con un promedio histórico de duración de 152 días. Se decidió bajar sarta completa con el nuevo material esperando a que el ensayo durara por lo menos 304 días. Se produjo una pesca en el tramo de 7/8" luego de 645 días (o sea, con una duración 4,24 veces superior que el valor del promedio histórico). Reem-

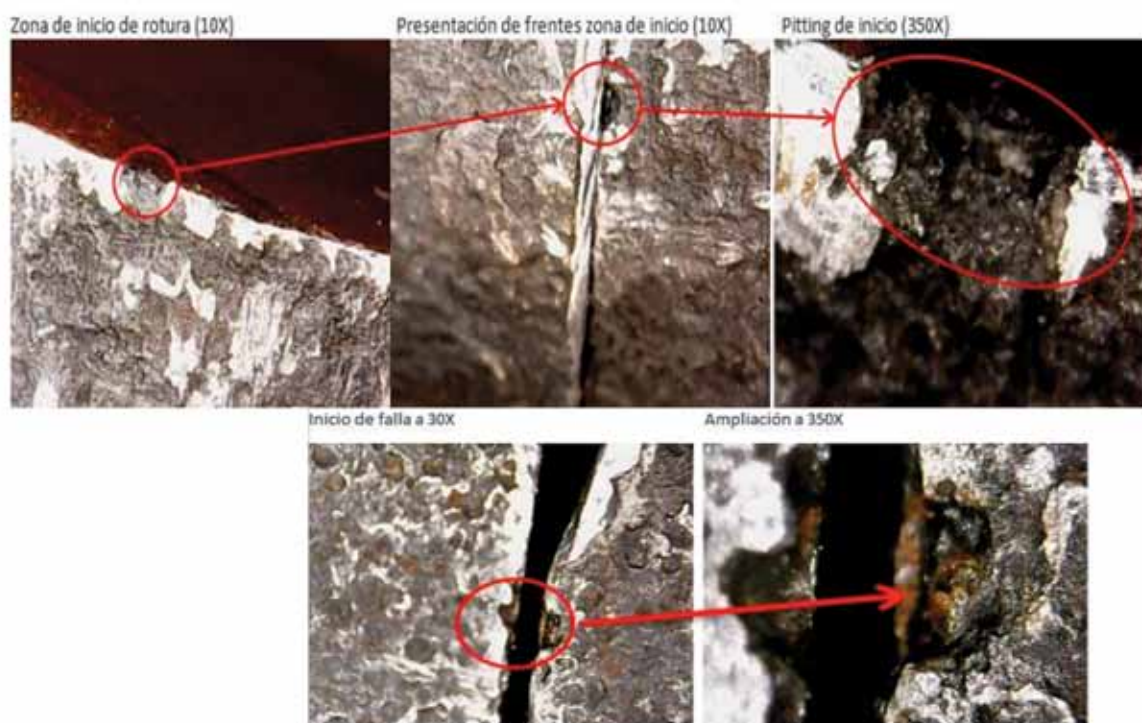


Figura 7. Fallas en varillas de bombeo.

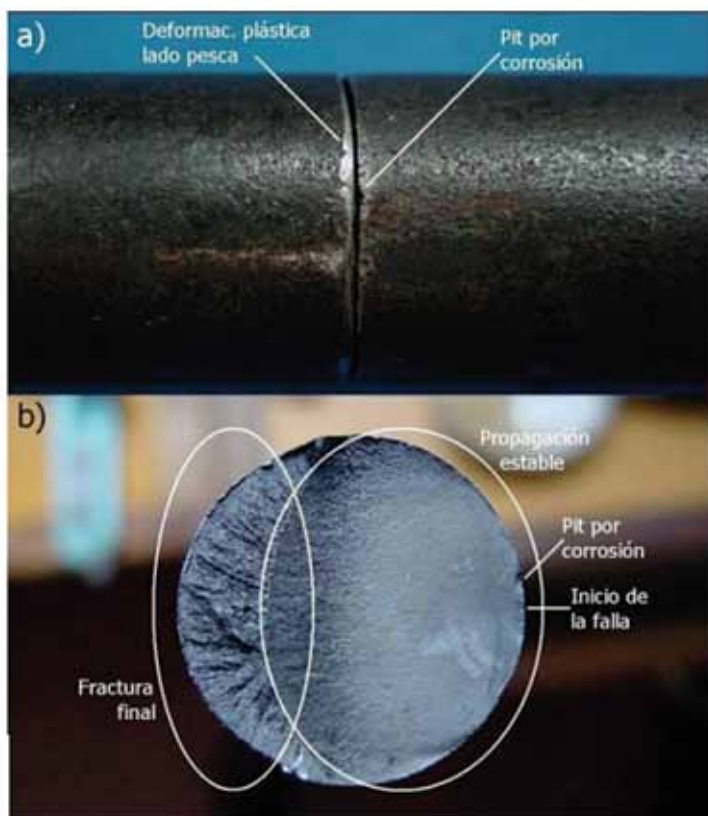


Figura 8. Protección de fallas en varillas de bombeo.

plazado el tramo de 7/8", el tramo de 1" continúa trabajando y en el momento de redactar este trabajo llevaba acumulado 673 días en operación, o sea que en ese momento superaba en 4,89 veces el valor histórico. El tramo nuevo de 7/8" continuaba trabajando sin inconvenientes.

Por los esfuerzos propios presentes en el Pozo 3 y por los antecedentes de fallas existentes, se decidió bajar el nuevo material con conexiones PREMIUM. El promedio histórico de duración del pozo era de 130 días, con lo que se daría por concluido el ensayo si se superaban 260 días en operación. Al momento de presentar este trabajo el pozo llevaba acumulado 557 días sin inconvenientes, o sea que en ese momento superaba en 4,82 veces el valor histórico.

Las estadísticas del Pozo 4 mostraban que las fallas se producían exclusivamente en el tramo de 1", con lo que se decidió utilizar el nuevo material solamente para reemplazar esas varillas. El promedio histórico de duración del pozo era de 51 días, con lo que se daría por concluido el ensayo

si se superaban 102 días en operación. Pero en el día 98 del ensayo, el pozo sufre por primera vez una pesca en el tramo de 7/8". Este tramo es reemplazado por el nuevo material, y el de 1" continuó trabajando sin ser reemplazado. En el momento de redactar este

trabajo el tramo de 1" llevaba acumulado 394 días sin inconvenientes, o sea que en ese momento superaba en 9,1 veces al valor histórico. El tramo de 7/8" llevaba acumulado 250 días en operación, lo que daría una mejora de 3,27 veces si se tomara como run life histórico el valor de 98 días.

En el Pozo 5 se tenía antecedentes de fallas por corrosión fatiga alternativamente en los tramos de 1" y de 7/8" con un promedio histórico de duración de 133 días. Se decidió bajar el nuevo material solamente en esos tramos apuntando a que el ensayo durara por lo menos 266 días. Al momento de presentar este trabajo el pozo llevaba acumulado 371 días sin inconvenientes, o sea que en ese momento superaba en 3,32 veces al valor histórico.

El Pozo 6 aún se encuentra bajo estudio. Las estadísticas mostraban que las fallas se producían exclusivamente en el tramo de 1", con lo que se decidió utilizar el nuevo material solamente para reemplazar esas varillas. Antes de concluir el ensayo hubo una pesca primero en la varilla N° 4 que se cambió por trozos, luego de otra pesca se cambia el tramo de 1", seguido de otra pesca en 7/8" en la que se cambia toda la sarta para finalmente sufrir una pesca en una cupla de 1".

Un grupo multidisciplinario abordó la búsqueda de las causas de falla apuntando a todas las variables posibles: composición química del acero, microdureza, estructura metalo-

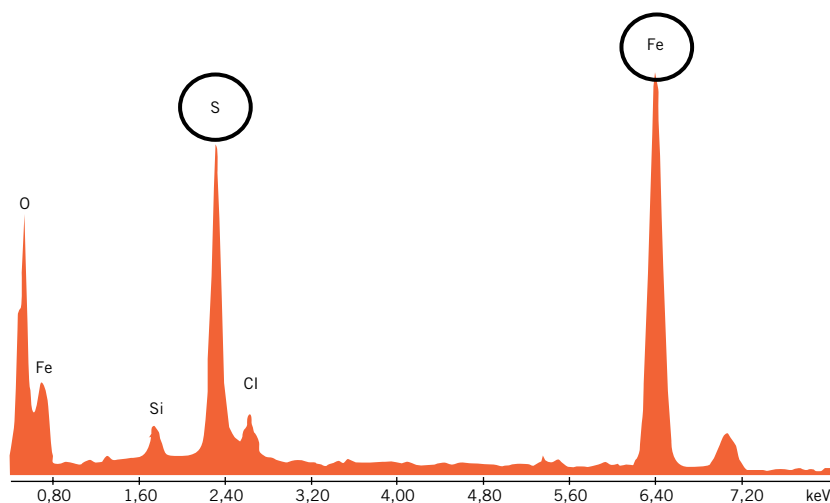


Figura 9. Se muestra varilla con ataque corrosivo y fractura por fatiga en el cuerpo iniciada en pitting de corrosión por SH_2 . El análisis por MEBA en los productos de corrosión al inicio de la fractura detectó O-S-Fe-Cl, seguramente óxidos de hierro y sulfuros de hierro.

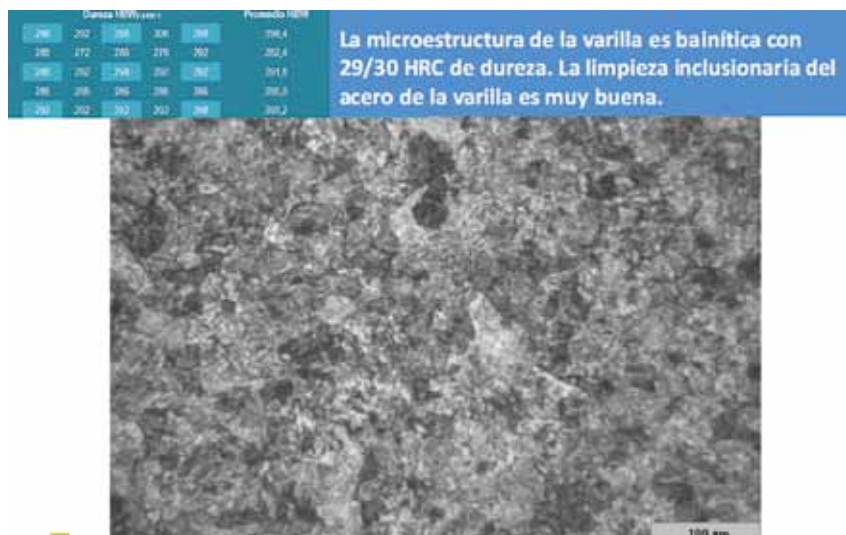


Figura 10. Microestructura de una varilla.

Elemento	Valor típico (%)	Elemento	Valor típico (%)
C	0,24	Cr	1,00
No	0,70	Mn	0,60

Propiedades mecánicas

YS Min (0,2% offset)	110ksi (689 MPa).
UTS	115 to 140 ksi (793 to 965 MPa)
Elongación (2")	10% Mín.
Dureza	26 HRC
Resistencia al impacto (CVN@ 20°C) Valor típico	180 J

gráfica, determinación de impurezas (desde el punto de vista de la varilla), y determinación del Ph del fluido bombeado, concentración de CO_2 , concentración de H_2S , cantidad de bacterias presentes, concentración de cloruros y oxígeno (desde el punto de vista del medio en que trabajan las varillas). Asimismo, se evaluó el estado tensional solicitado por la aplicación como consecuencia de la profundidad, régimen de bombeo (carrera y GPM), diseño del pozo, características de la instalación, etc.

Además de los ensayos de laboratorio del fabricante del acero y de la compañía productora, se contrató a una tercera empresa para efectuar evaluación de fluidos (agua, petróleo y gas) en estado de producción. Se determinaron en agua in situ CO_2 , H_2S , O_2 , alcalinidad, Ph, bacterias, y en gas in situ CO_2 , H_2S y se tomó muestra para efectuar cromatografía.

Adicionalmente se entregó a esta tercera empresa tres productos químicos comerciales que son utilizados en el tratamiento habitual de los pozos productores para verificar la posible

agresividad de los mismos sobre el material de las varillas. Se ensayó la corrosividad generada por la combinación adecuada de químicos y agua del pozo sobre testigos de varillas, en condiciones de blanco (sin agregado de producto químico), de dosificación (con la adición del producto químico en proporción correcta) y en sobredosificación (al doble de la dosis recomendada de producto químico). Las determinaciones se efectuaron sobre cupones de corrosión previamente cortados, pulidos, pesados y medidos con precisión.

Lamentablemente al momento de redactar este trabajo no se ha encontrado la causa de falla en este pozo específico, que fue la excepción de los ensayos encarados con este material. A pesar de ello y basado en los resultados de los otros pozos del ensayo piloto se da por aprobado al material para aplicaciones especiales de fallas por corrosión-fatiga.

Los resultados obtenidos con este nuevo material nos invitaron a probar otro acero que es parte de este desarrollo metalúrgico, el que aún no ha sido utilizado en la industria nacional ni internacional. Es un acero propuesto para altas cargas y corrosión moderada. Lo sorprendente de este material es que en general los aceros que tienen alta resistencia mecánica tienen muy baja resistencia a la corrosión y viceversa, aquellos que tienen buena resistencia a la corrosión tienen mala resistencia mecánica.

Si analizamos las propiedades mecánicas de este nuevo acero veremos

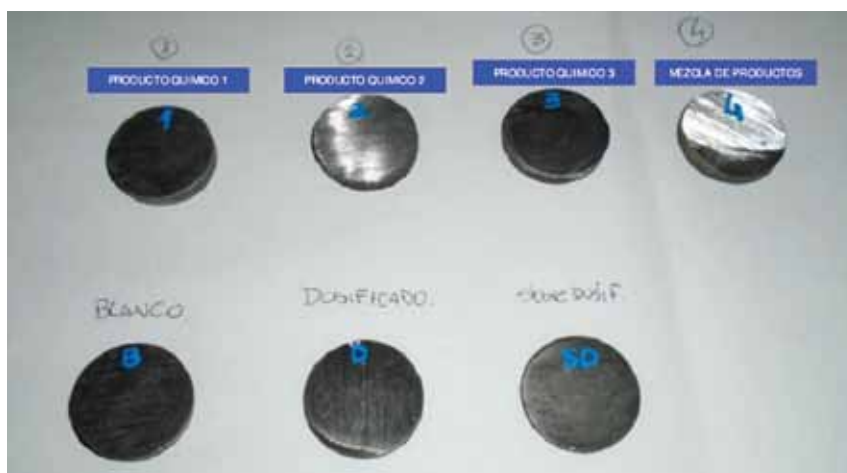


Figura 11. Ensayos de corrosividad.

Acero para alta carga y corrosión media

Propiedades mecánicas

YS Mín (0,2% offset)	135 ksi (930 Mpa)
UTS	155 ksi (1068 Mpa)
Elongación (2")	10% Mín
Resistencia al impacto (CVN@20°C) Valor típico	150 J

una diferencia notoria respecto de las de un acero tradicional, con valores de tensión de fluencia y tensión de rotura muy superiores al de un acero grado "D Alloy". Adicionalmente, la tenacidad de este acero es de 150 Joules (valor típico obtenido en ensayos Charpy con entalla en V a 20 °C). Los altos valores de tensiones fluencia y rotura del material, lo hacen apropiado para soportar altas cargas, y el alto valor de tenacidad es lo que lo hace apropiado para soportar corrosión media. Sus características mecánicas permitirían que las varillas fabricadas con este material trabajen al 190% de Goodman equivalente a un acero grado "D Alloy", con una resistencia a la corrosión fatiga muy superior a la de ese material.

No habiendo antecedentes de aplicación en la industria, se efectuaron simulaciones con un software de diseño de bombeo mecánico. Se buscó tener una comparación cualitativa de los posibles límites de aplicación del

sistema con los materiales habituales de las varillas utilizadas por PAE y con este nuevo material aún no probado. Para las simulaciones se asumieron las siguientes premisas: Todos los casos se efectuaron con sarta API 86 sin barras ni varillas de peso.

Se aceptó hasta 130% de Goodman para las varillas grado "D Alloy" y hasta 190% de Goodman para las varillas con el nuevo acero, en todos los casos con un factor de servicio de 0.9.

No se aceptó flotación ni pandeo de la sarta. Se limitó a que las cargas

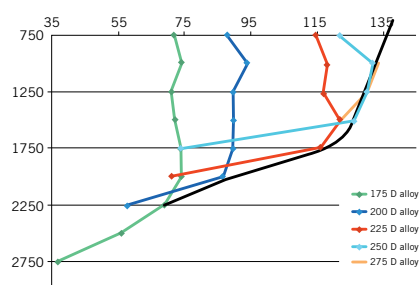


Figura 15. Límites de aplicación de varillas grado D.

laterales no excedan 200 libras sin perjuicio de la posición del punto neutro.

Las velocidades de bombeo limitantes fueron 4,5 GPM como mínimo y 10 GPM como máximo. Se estableció que las cargas estructurales y torques de los AIB utilizados no superen el 100%.

Se efectuaron simulaciones con equipos Mark II (M), Contrabalanceados por Aires (A), Convencionales (C), Rear Mounted (RM), y equipos de bombeo de carrera larga hidráulicos y mecánicos.

La mayoría de los casos presentados en este trabajo son con AIB M1280-427-216 para circunscribir el análisis comparativo principalmente al material de las varillas. Se efectuaron simulaciones con bombas mecánicas de diámetros 1 3/4", 2", 2 1/4", 2 1/2" y 2 3/4", adoptando una eficiencia del 80%.

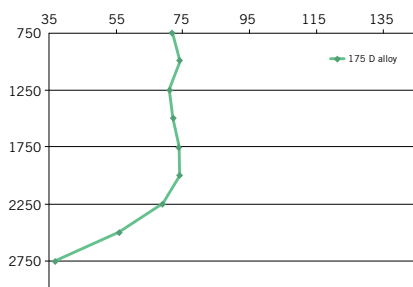


Figura 13. Límites de aplicación de varillas grado D.

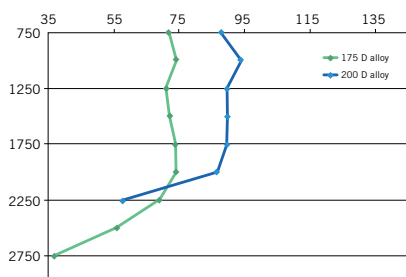


Figura 14. Límites de aplicación de varillas grado D.

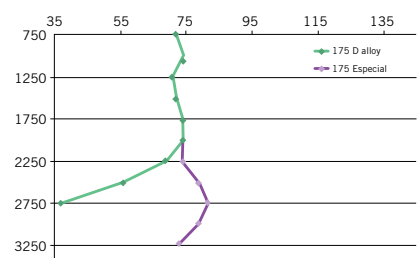


Figura 16. Varillas con acero especial.

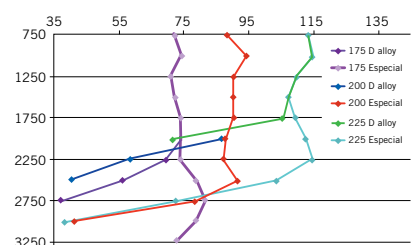


Figura 17. Varillas con acero especial.



Si tomamos los resultados obtenidos, considerando una bomba de 1 $\frac{3}{4}$ " con varillas grado "D Alloy" y lo graficamos llevando en el eje de las X la producción calculada en m³/d y en el eje de las Y la profundidad en metros (creciente hacia abajo), se obtiene una curva que representa el límite de aplicación de las varillas para ese tamaño de bomba. Todo punto que se encuentre a la izquierda de la misma representa una condición de bombeo aceptable, mientras que todo punto que se encuentre a la derecha y/o abajo representa una situación indeseable en la que se pone en riesgo al sistema.

Si se toman los resultados obtenidos para una bomba de 2" con varillas grado "D Alloy" y lo volcamos en el mismo gráfico, vemos que la producción esperada aumenta pero no se podrá ir tan profundo como en el caso de la bomba de 1 $\frac{3}{4}$ ".

Volcando los resultados de los otros tamaños de bombas veremos que se puede delinear una curva (en negro)

que representa el límite de aplicación para las varillas grado "D Alloy".

Si tomamos ahora los resultados obtenidos considerando una bomba de 1 $\frac{3}{4}$ " con ambos grados de varillas, vemos que las fabricadas con el acero especial pueden ir mucho mas profundo que las de grado "D Alloy".

Llevando los resultados obtenidos de otros tamaños de bombas vemos que las simulaciones mostrarían la misma tendencia, las fabricadas con el acero especial pueden ir mucho mas profundo que las de grado "D Alloy".

O sea que la utilización del nuevo acero nos permitiría incrementar las profundidades entre 750 y 1000 m con el nuevo acero, sin exceder ninguna de las premisas de diseño adoptadas.

Hasta aquí hemos mostrado simulaciones obtenidas a partir de considerar la utilización de equipos Mark II, básicamente porque el 50% del parque de AIB con el que cuenta PAE en la Unidad de Gestión del Golfo San Jorge corresponde a este tipo de apa-

rato de bombeo. Pero los resultados de las simulaciones con otro tipo de AIB son también prometedores.

Si tomamos por ejemplo los resultados obtenidos para bombas de 2 $\frac{1}{4}$ " (que corresponde al tamaño intermedio de modelos existentes) y comparamos las curvas generadas por un Mark II (Front Mounted Clase III según el Std. API 11E) modelo M1280-427-216 con las de un AIB RM (Rear Mounted Clase I según el Std. API 11E) modelo RM1280-427-216CW funcionando con la manivela en sentido horario (con la cabeza de mula a la derecha), vemos que además de poder ir a aplicaciones más profundas con el nuevo acero, también se obtienen mayores producciones.

Es importante hacer notar que este mismo AIB RM pero funcionando con la manivela en sentido antihorario (RM1280-427-216CCW) no permite tener aplicaciones tan profundas como las que se obtienen en sentido horario, pero con el nuevo acero permite obtener mayor producción de fluido (aproximadamente un 50% mas de producción que el Mark II con una bomba de 2 $\frac{1}{4}$ " y con las premisas de diseño adoptadas). Este hecho nos permite vislumbrar la posibilidad de utilizar el sistema de bombeo mecánico en pozos que son explotados con el sistema de bombas electro-surgibles.

Conclusiones

- Se consideró que el ensayo del acero resistente a la corrosión fatiga ha sido exitoso dado que como mínimo ha duplicado la vida en servicio de los pozos involucrados.
- Existe un caso considerado excepción del cual aún no conocemos la causa por la cual falló. Se continúa evaluando la presencia aleatoria de bacterias o la posible influencia de algún producto químico que pudiera haber sido el causante de las fallas.
- El acero apto para altas cargas y corrosión moderada se ensayará en pozos profundos, con alto porcentaje de Goodman y en reemplazo de electrosurgibles.