



Congreso de Producción del Bicentenario

“El desafío de producir más energía”

18 al 21 de mayo de 2010
Ciudad de Salta, Argentina

Daniel Muse (Tenaris)
Francisco Diaz Telli (Tenaris)

Varillas con Conexión Premium Expanden las Barreras del Bombeo Mecánico

Sinopsis

Las fallas en la conexión de las Varillas de Bombeo han pasado a ser la principal limitante del Bombeo Mecánico. La mayor demanda de las condiciones operativa en yacimientos ha llevado la conexión a sus límites, volviéndose el elemento más débil del sistema.

Las Especificaciones de API (11B) para Varillas de Bombeo no han tenido importantes cambios desde hace unos 50 años. El hecho de la pobre distribución de tensiones en la conexión, conjuntamente con su tendencia a desajustarse debido a la falta de interferencia en la rosca forman las principales causas de puntos concentradores de tensiones que finalmente llevan a roturas (pescas).

Después de varios intentos en resolver este problema, se desarrolló una nueva conexión Premium. Tanto los ensayos de laboratorio como de campo han mostrado que es capaz de trabajar por encima de las capacidades del cuerpo de la varilla por lo que con este cambio revolucionario, se han expandido las aplicaciones del Bombeo Mecánico.

El presente trabajo busca analizar y comentar la experiencia en uno de los principales yacimientos del país que esta actualmente trabajando con varillas con conexión Premium.

Introducción

Los sistemas artificiales de bombeo están siendo empujados hasta sus límites operativos dado las condiciones cada vez más demandantes de operación en los yacimientos: pozos más profundos y niveles de producción cada vez más altos. Con el paso de los años, el número de proyectos de recuperación secundaria y proyectos de producción no convencionales han incrementado y cada vez se exige más al sistema de bombeo mecánico (BM) y de bombeo por cavidades progresivas (BCP), entre otros.

Ambos sistemas, BM y BCP, han encontrado a la sarta de varillas de bombeo como uno de los puntos más débiles del sistema. Análisis de solicitaciones y estadísticas de falla para diferentes partes de las varillas de bombeo han encontrado a su conexión como el punto más débil. Roturas en el pin o en la cupla se han convertido problemas comunes en el campo dejando en claro que la resistencia a la fatiga de la unión es inferior a la resistencia a la fatiga del cuerpo de la varilla. Fig. 1.

Se realizaron varios intentos para incrementar la capacidad de trabajo de las varillas pero ninguno atacó la génesis del problema: el diseño de la conexión. A pesar de esto, recientemente una conexión Premium de varillas fue desarrollada con un nuevo perfil de rosca que ha demostrado resultados muy positivos en la reducción de la fatiga de la conexión. Fig. 2

Diseño de la Conexión

Se utilizó el análisis por elementos finitos (Finite Element Analysis –FEA–) como una herramienta numérica para verificar los potenciales diseños, previo a que los ensayos en laboratorio y en campo pudieran realizarse. Con FEA, se analizaron las principales limitaciones de las conexiones convencionales de las varillas de bombeo y se establecieron las bases para el nuevo diseño de conexión.

Los principales puntos atacados con el desarrollo del nuevo diseño de rosca fueron los siguientes:

- Tendencia de la conexión a aflojarse dada la existencia de un huelgo entre los hilos de rosca. Este huelgo permite movimiento relativo entre los hilos de rosca del pin y de la cupla cuando la varilla sufre golpes y/o compresión.
- Deformaciones permanentes (plásticas) en la conexión, después del armado de la conexión o durante la operación de la varilla, verificadas con FEA. Estas deformaciones facilitan la propagación de fisuras y así facilitan la aparición de fallas. A su vez, dificultan la repetición del desplazamiento circunferencial durante el armado de la conexión.
- La distribución poco uniforme de las solicitaciones en el perfil de rosca genera puntos concentradores de tensión y, como resultado, hace al pin y a la cupla más susceptible a tener aparición de fisuras (también fue verificado con FEA).
- Gran dependencia en la operación de armado de la conexión por sobretorque (incrementa los niveles de sollicitación) o falta de torque (crea puntos concentradores de tensiones durante la operación en pozo de la varilla) que son dañinos para la conexión y llevan a fallas en los pines o cuplas. En las conexiones convencionales, su efectividad es muy dependientes de la limpieza previa a la instalación de la sarta en el pozo y un deficiente armado de la conexión puede estar fácilmente ligado a futuras fallas.

Las principales características del nuevo diseño de rosca involucran un filete de rosca con perfil trapezoidal, interferencia diametral de ambos flancos de rosca y un bajo nivel de solicitaciones después del armado de la conexión. El huelgo entre los hilos de rosca del pin y de la cupla, de un diseño de rosca convencional, fue eliminado con el contacto entre ambos flancos de los hilos de rosca y por lo tanto la tendencia al desajuste fue reducida. Además, las deformaciones plásticas en la rosca fueron reducidas y se logró una importante mejora en la distribución de tensiones tanto para el armado de la conexión como durante la operación a fatiga en el pozo, gracias a la reducción de solicitaciones en el pin. Esta reducción de solicitaciones en el armado es una consecuencia de la interferencia de rosca que la hace requerir un pequeño desplazamiento circunferencial para el armado de la conexión. En general, se logró una reducción significativa de las solicitaciones en la interfase pin/cupla.

Fig. 3 (a y b) muestra las limitaciones del diseño de conexión API y las mejoras del diseño de conexión Premium.

Criterio de daño por fatiga para solicitaciones multiaxiales.

Para evaluar analíticamente la resistencia a la fatiga multiaxial simple (caso en que las principales solicitaciones alternativas no cambian de dirección relativa a la parte en trabajo) se utilizó el método de Sines. El mismo consiste en calcular un coeficiente llamado *Factor de Fatiga D*, que predice la vida a la fatiga en un punto. El mismo se calculó para diferentes puntos de la conexión API y de la nueva conexión, observándose una notable mejora en los valores para el nuevo diseño (el coeficiente predice mayor vida a la fatiga a medida que aumenta su valor y se transforma en crítico para valores por debajo de -10). Fig. 4

Ensayos de Laboratorio

Se realizó una serie de ensayos de laboratorio a plena escala (Fig. 5) para los diámetros de conexión más utilizados (3/4", 7/8" y 1"). Se comparó el desempeño del nuevo diseño de conexión con el diseño de rosca API y la nueva conexión probó ser al menos tres veces más resistente a la fatiga.

Se verificó un óptimo comportamiento de la nueva conexión trabajando a valores por encima del 300% de la capacidad¹ de una varilla Grado D según recomiendan las especificaciones de API. Los ensayos se consideraron aprobados sólo cuando se superan los 10 millones de ciclos sin fallas (Tabla 1 – Fig. 6).

Experiencia de Campo

Veinticinco pozos en BM y nueve en BCP se han ensayado en compañías operadoras en Argentina, Canadá y Estados Unidos. Se han encontrado principalmente cinco aplicaciones (Tabla 2).

Altas cargas/aumento de la producción. Las varillas con conexión Premium fueron instaladas en nueve pozos donde el sistema de BM era prácticamente impracticable y/o se utilizaba bombas electrosumergibles (BES). La profundidad y producción promedio de estos pozos era de 2187 m (7175 pies) y 78 m³/d (490 bpd).

El pozo PE-20 produce 135 m³/d (849 bpd) con la bomba a una profundidad de 2200 m (7216 pies). Utiliza una unidad de grandes capacidades (M1824-427-216) para evitar sobrecargas. En este pozo, se reemplazó una BES dando lugar a mayor eficiencia en la producción (menores costos energéticos) y mantenimiento más simple. Se utilizó una unidad que estaba en stock, reduciendo los costos de inversión también.

Los restantes pozos bajo esta misma aplicación están utilizando unidades M1280-427-912 y M912-365-192. La mayor capacidad a la fatiga de las varillas con conexión Premium puede permitir obtener un aumento de producción de hasta el 30%.

Fig. 7 muestra el aumento teórico en la producción al utilizar las nuevas varillas.

Reducción de las fallas en la conexión. Se ensayó esta aplicación en ocho pozos con una profundidad de bomba promedio de 1000 m (3280 pies) y con producción promedio de 104 m³/d (655 bpd). Al momento se obtuvo una reducción de las fallas de al menos 3 por año.

Uno de los primeros pozos en instalarse (PE-02) ha trabajado por 16 meses sin fallas, comparado con un promedio previo de dos fallas en la conexión por año. El pozo PE-06 ha llegado a los 13 meses de trabajo sin ninguna falla en la conexión, en comparación con una estadística previa de cuatro fallas por año. Los rangos de producción se han mantenido sin cambios.

Reducción en el peso de la sarta. En algunos pozos se llegaba a la capacidad límite de la unidad de bombeo y se ensayaron las varillas reduciendo el diámetro comúnmente usado con varillas convencionales a fin de reducir el peso de la sarta. Ese fue el caso del pozo PE-16 que consta principalmente de varillas de 3/4" y 7/8" (las varillas de 1" son sólo el 13% de la sarta).

Este es el pozo más profundo que se ha ensayado (2949 m - 9675 pies) y que también tenía problemas de arena e integridad del casing. Como resultado, el pozo no podía ser producido con el actual nivel de producción hasta la instalación con varillas con conexión Premium fue completada. Una varilla Grado D convencional estaría trabajando en este pozo a un nivel de solicitud¹ comparativo cercano al 200%.

Reemplazo de varillas de Alta Resistencia (AR). La conexión Premium permite la utilización de un material menos frágil para reemplazar varillas de AR, que no se recomiendan para ambientes corrosivos. Dos pozos se han ensayado en esta aplicación.

El pozo PE-01 tiene un tramo de 7/8" con conexión Premium entre varillas de 1" y 3/4" de AR. Este pozo tiene un historial de tres fallas por año en 7/8" pero desde que tiene las varillas con conexión Premium el pozo ha funcionado casi cuatro años y medio sin ningún problema en este diámetro. En el periodo de ensayo se han registrado fallas en 1" y 3/4" que aún poseen varillas de AR convencionales.

Una sarta completa con conexión Premium se instaló en el pozo PE-08 que ha estado funcionando más de un año sin ningún problema de corrosión; mientras que en el pasado las varillas de alta resistencia sufrían un promedio de 3 fallas cada 6 meses (o seis fallas por año en dos sarts nuevas).

Mayor resistencia al torque en la conexión (aplicaciones de BCP). La mayor parte de las fallas en la conexión en aplicaciones de cavidades progresivas toman lugar en la unión de las varillas y están causadas principalmente por sobretorque o desenrosque como resultado del efecto de *backspin*. La interferencia de rosca en el nuevo diseño le da a la conexión un aumento cercano al 20% en la capacidad de torque haciéndola más difícil de sobretorquar. A su vez, el mayor torque de armado la hace más resistente a torques inversos (en sentido de desenrosque) durante el *backspin*. El resultado es una conexión más confiable para operaciones al torque, en especial para altas velocidades.

El pozo PE-09, con una producción de 253 m³/d (1590 bpd) y bomba a 846 m (2774 pies), ha estado trabajando por más de 16 meses a 370 RPM sin haber sufrido fallas a pesar de haber sido parado y arrancado varias veces.

Armado de la Unión (Make-Up)

La nueva conexión ha mostrado principalmente dos beneficios durante la operación de armado. Primero, la interferencia provee resistencia al torque y la hace a la conexión muy difícil de sufrir sobretorques. Segundo, se ha observado una excelente repetición en los desplazamientos circunferenciales. Fig. 8

Cabe mencionar que las cuplas reducción (*subcouplings*) se han reemplazado por trozos de dos pies de largo con pines de diferentes tamaños en cada extremo. El mismo concepto ha sido utilizado para los *cross-overs* (combinaciones de roscas) que se utilizan para conectar una rosca API con una Premium. Esto hace que las uniones con cambios de rosca o dimensiones sean más fáciles de armar ya que las cuplas reducción/*cross-over* hacen que los desplazamientos requeridos sean diferentes para cada lado de las mismas y tengan que realizarse por separado. Fig. 9

Dado que las conexiones Premium poseen interferencia, se observa un tiraje de rosca (el contacto entre los espejos de la varilla y de la cupla no puede obtenerse ajustando a mano) y por lo tanto el calibrado de la llave hidráulica del equipo debe realizarse en dos etapas. La primera es sólo para asegurar el contacto entre los espejos y el segundo es para realizar el desplazamiento circunferencial requerido. Es importante destacar que estas dos etapas sólo se requieren para fijar (calibrar) la presión de la llave hidráulica ya que a partir de ese punto, todas las varillas se deben ajustar en una sola etapa.

Observaciones:

- No se requieren herramientas especiales para la instalación de las nuevas varillas. La única diferencia es que las varillas de 7/8" poseen un cuadrante reforzado de iguales dimensiones a las varillas Grado EL y PL ya existentes en el mercado (las mordazas son de uso común en el campo).
- Dada la interferencia, las roscas deben ser engrasadas para evitar el engrane. Se utiliza grasa convencional de tubing. No se han observado problemas de engrane después de 4 operaciones de ajuste.
- Si bien se observó un aumento en el tiempo de equipo, el mismo se atribuye principalmente a capacitación del personal y calibración de la llave, ya que el resto de la operación no tiene diferencias con respecto a las varillas convencionales.
- Las presiones de llave requeridas para el ajuste de la conexión Premium es aproximadamente 10% mayor a la requerida para ajustar varillas de alta resistencia del mismo diámetro.
- Para operaciones de rearmado de la conexión, se observan leves disminuciones en la presión de llave requerida.
- Para evitar problemas de identificación de las nuevas varillas las mismas deben poseer una marcación diferencial así como un cambio en los colores del empaquetado.
- Los análisis teóricos, junto con los ensayos de laboratorio y de campo dieron lugar a una nueva curva de Goodamn para las varillas con conexión Premium. La misma

indica una resistencia a la fatiga aproximadamente 10% mayor a la de las varillas de alta resistencia. Fig. 6

Fabricación

No detallada en este trabajo.

Sólo se hace notar que se requiere instrumental especial para la fabricación así como para los controles de calidad del producto.

Conclusión

La unión de la varilla convencional es el punto más débil en una sarta de varillas trabajando a la fatiga, lo cuál ha llevado a las compañías petroleras a manejar un alto número de pescas (fallas en varillas) y un consecuente aumento del costo operativo. Esto, empujó el desarrollo de un nuevo diseño de conexión con mayor resistencia a la fatiga (verificado en laboratorio y en ensayos de campo). Se ha ensayado treinta y cuatro pozos bajo diferentes aplicaciones entre las que podemos destacar:

- Altas cargas / Aumento de la producción
- Reemplazo de varillas de alta resistencia en pozos corrosivos.
- Reducción en las pescas de conexión.
- Reducción en el peso de la sarta.
- Mayor confiabilidad en las operaciones de torque (BCP).

Los resultados han mostrado que al obtenerse una conexión con mayor capacidad a la fatiga que el cuerpo de la varilla de bombeo, la capacidad del BM ha aumentado al igual que su confiabilidad.

Notas

¹ Para la evaluación del nivel de sollicitación de las varillas Grado D se utiliza el diagrama de Goodman Modificado recomendado por API. (Anexo I)



Fig. 1—Problemática de fallas observadas en el campo con diseño de rosca convencional.



Fig. 2—Nuevo diseño de conexión Premium de varilla de bombeo.

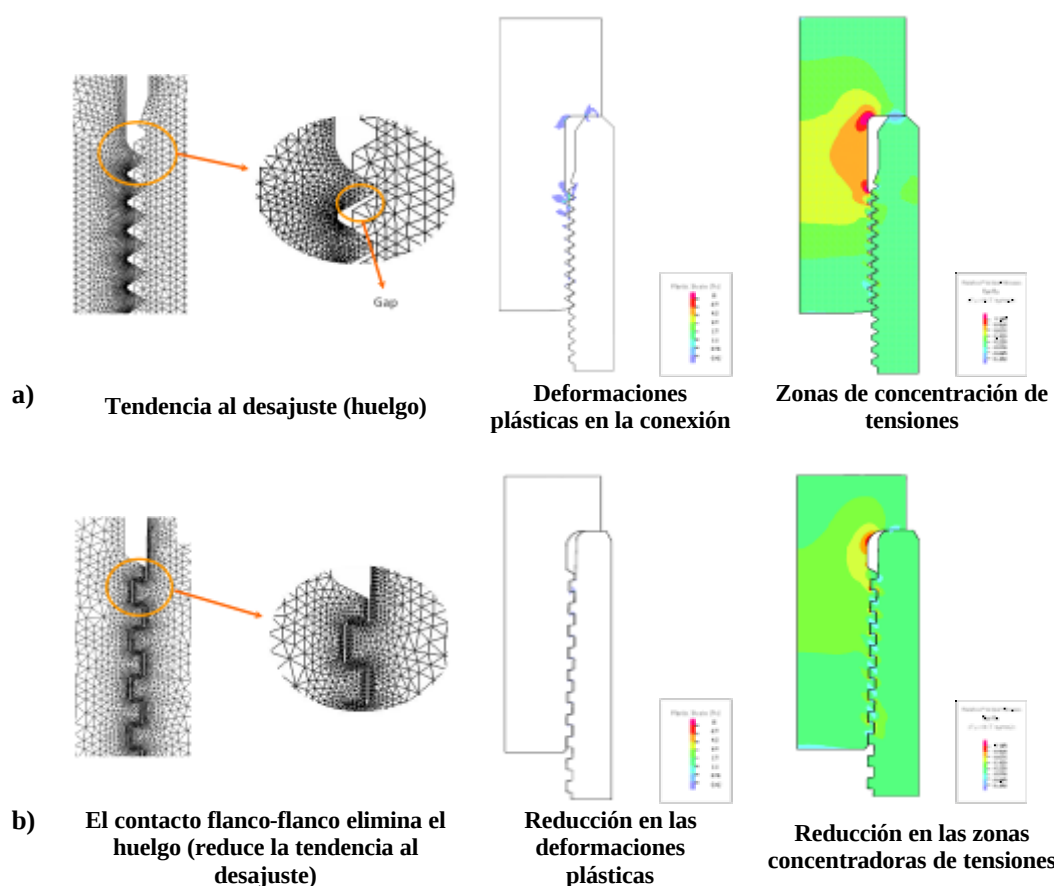


Fig. 3—a) Limitaciones del diseño de rosca API; b) Mejoras en el diseño de rosca Premium.

$$D = \frac{\frac{T}{3} - \overline{\sigma}_m}{\sigma_a}$$

$$\overline{\sigma}_m = \frac{S_{m1} + S_{m2} + S_{m3}}{3}$$

$$\sigma_a = \frac{[(S_{a1} - S_{a2})^2 + (S_{a2} - S_{a3})^2 + (S_{a3} - S_{a1})^2]^{1/2}}{\sqrt{2}}$$

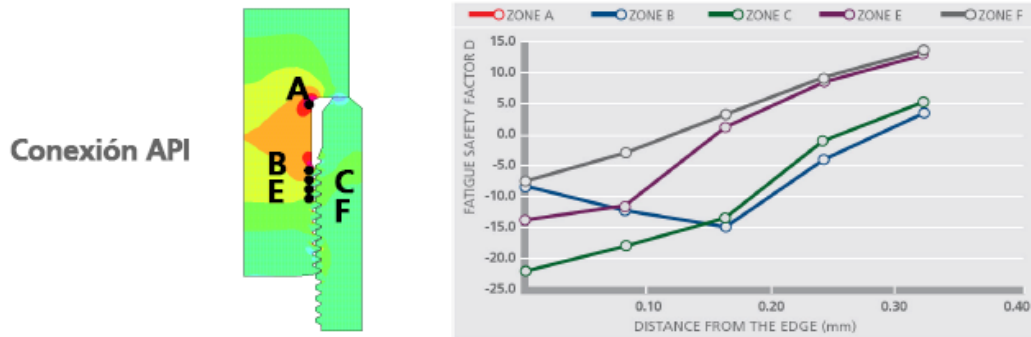
$$S_{ai} = \frac{S_{i,max} - S_{i,min}}{2} \quad (\text{componente alternativa de la sollicitación principal})$$

$$S_{mi} = \frac{S_{i,max} + S_{i,min}}{2} \quad (\text{componente principal de sollicitación})$$

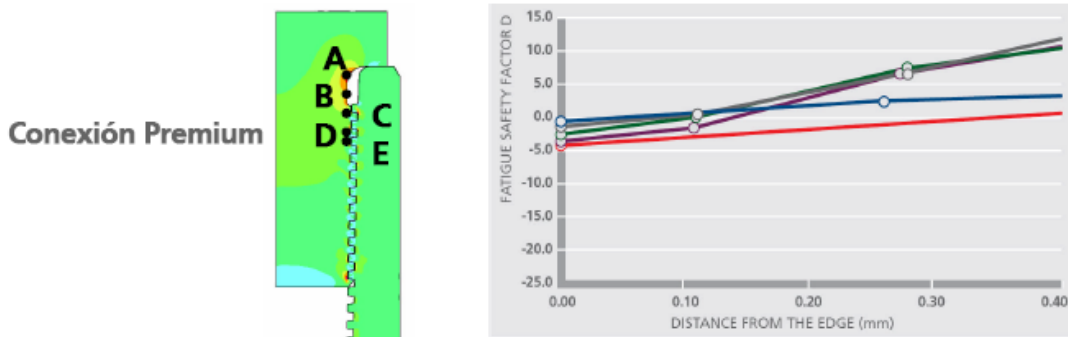
Donde:

- D: indicador de fatiga. (D > 1)
- T: Tensión de rotura mínima.
- Sm i: Componente principal de sollicitación.
- Si max: Componente máxima de la sollicitación principal.
- Si min: Componente mínima de la sollicitación principal.

Ecuación del factor de fatiga multiaxial de Sines



Factor de fatiga multiaxial de Sines para el diseño de rosca API



Factor de fatiga multiaxial de Sines para el diseño de rosca premium

Fig. 4—Análisis del daño por fatiga para sollicitaciones multiaxiales.



Fig. 5—Máquina de ensayos a la fatiga a plena escala.

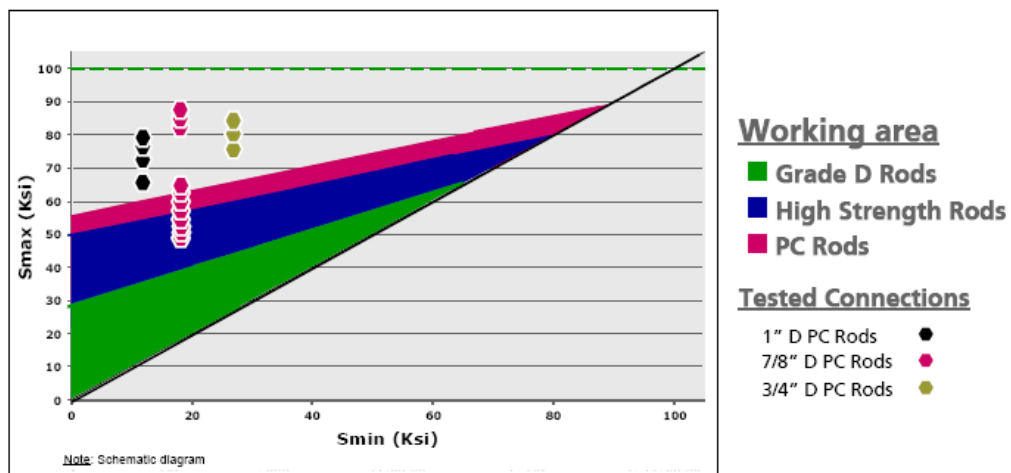


Fig. 6—Niveles de sollicitación de los ensayos en laboratorio. Diagrama de Goodman para varillas con conexión Premium.

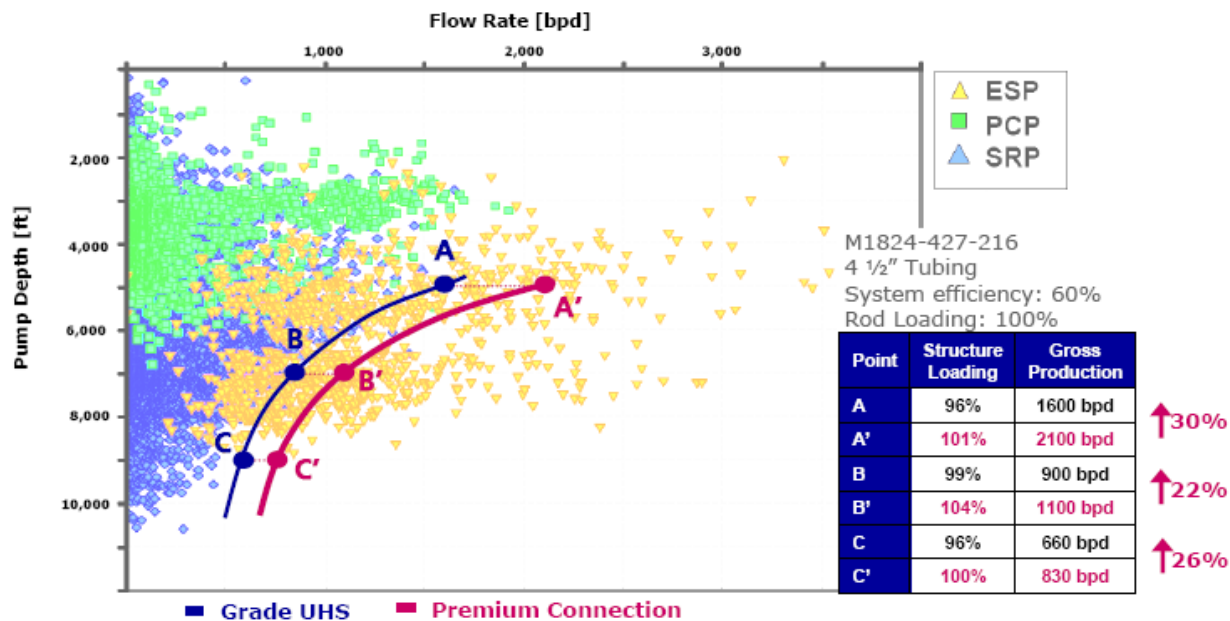
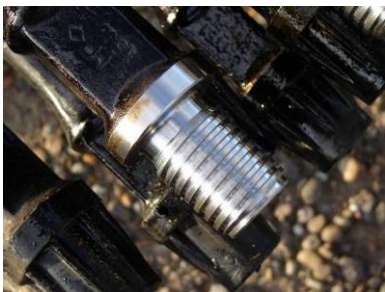


Fig. 7—Aumento teórico en la capacidad de producción al comparar varillas convencionales de alta resistencia con varillas con conexión Premium.



1° Limpieza de la conexión



2° Engrase de la rosca



3° Posición de Ajuste a mano



4° Verificación de contacto de los espejos



5° Control de desplazamiento circunferencial

Fig. 8—Procedimiento de armado de la conexión.

Varillas con Conexión Premium Expanden las Barreras del Bombeo Mecánico



Rosca con diseño Premium

Rosca con diseño API

Fig. 9—Cross-over para conectar roscas API con roscas Premium.

TABLA 1 – ENSAYOS DE LABORATORIO A LA FATIGA AXIAL										
Varilla		Carga Max.		Smax	Carga Min.		Smin	%	Cantidad de ciclos	
Diam.	Conexión	(Ton)	(Lbs)	(Ksi)	(Ton)	(Lbs)	(Ksi)	Goodman	(Miles)	
3/4"	API	15	33069	75	5	11023	25.0	279.8	2960	Falla en pin
		15	33069	75	5	11023	25.0		4870	Falla en pin
	Premium	15	33069	75	5	11023	25.0	279.8	10000	
		16	35274	80	5	11023	25.0	308.0		
		17	37479	85	5	11023	25.0	336.0		
		18	38581	87	5	11023	25.0	350.0	1250	Falla en el cuerpo
7/8"	API	22	48502	81	5	11023	18.3	300.7	1400	Falla en pin
		22	48502	81	5	11023	18.3	300.7	1271	Falla en la cupla
	Premium	16	35274	59	5	11023	18.3	194.6	10000	
		16.5	36376	60	5	11023	18.3	203.4		
		17	37479	62	5	11023	18.3	212.3		
		17.5	38581	64	5	11023	18.3	221.2		
		18	39683	66	5	11023	18.3	230.0		
		22	48502	81	5	11023	18.3	300.7		
		23	50706	84	5	11023	18.3	318.7		
		24	52911	88	5	11023	18.3	336.0		
1"	Premium	23	50706	65	5	11023	14.0	223.5	10000	
		25	55116	71	5	11023	14.0	247.8		
		27	59525	76	5	11023	14.0	262.3		
		28.5	62832	81	5	11023	14.0	280.5		

Nota: A fin de poder llegar a los valores de ensayo requeridos, se utilizaron cuerpos reforzados en las muestras (cuerpo de 7/8" para ensayar conexiones de ¾" y cuerpos de 1 1/8" para ensayar el resto de las conexiones).

Varillas con Conexión Premium Expanden las Barreras del Bombeo Mecánico

TABLA 2 – EXPERIENCIA DE CAMPO: CARACTERÍSTICAS DE LOS POZOS (7 POZOS DE 34)							
Pozo ensayo	PE-02	PE-06	PE-01	PE-16	PE-20	PE-08	PE-09
Aplicación	BM	BM	BM	BM	BM	BM	BCP
Fecha de Instalación	5 Oct 08	8 Ene 09	23 Sep 05	20 Abr 09	18 Jun 09	25 Nov 08	3 Oct 08
Número estimado de ciclos (millones)	3.4	4.2	16.0	3.5	2.4	7.7	266
Días Trabajando	498	403	1606	301	242	447	500
Golpes por minuto (sólo BM)	4.7	7.3	7.8	8	6.9	12	370
Rev/min (sólo BCP)							
Unidad de Bombeo	Rotaflex 900-X320-360-288	Mark II 912-365-192	Mark II 912-365-168	Mark II 912-365-192	Mark II 1824-427-216	C320-305-100	N/A
Profundidad de la Bomba	[ft]	6,547	6,724	7,157	9,673	7,216	6,701
	[m]	1996	2050	2182	2949	2200	2043
Producción Bruta	[B/D]	925	440	440	377	849	390
	[m³/d]	147	70	70	60	135	62
Diseño de Sarta	Varillas de 1"	117	78	93	52	99	100
	Varillas de 7/8"	119	89	94	160	116	114
	Varillas de ¾"	0	93	77	160	58	0
	Barras de Peso ¹	26 (1")	9 (1 5/8")	20 (1 ½")	15 (1 5/8")	15 (1 5/8")	54 (1")
Bomba	2 ¾"	2"	2"	1 ¾"	2 ½"	2"	NTZ-400-150-ST78
Historial de Fallas	2/año	4/año	3/año	2/año	N/A	6/año	N/A

¹ Las Barras de Peso poseen diseño de conexión convencional.

TABLA 3 – DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES DE UNA SARTA DE BOMBEO CON VARILLAS CON CONEXIÓN PREMIUM	
POZOS CON BM	POZOS CON BCP
1) Vástago de bombeo convencional 2) Cupla de vástago de 1" API a 1" conexión Premium 3) Varillas conexión Premium de 1" 4) Cross Over de 1" a 7/8" conexión Premium (2 pies de largo) 5) Varillas conexión Premium de 7/8" 6) Cross Over de 7/8" a ¾" conexión Premium (2 pies de largo) 7) Varillas conexión Premium de ¾" 8) Cross Over de ¾" conexión Premium a ¾" API (2 pies de largo) 9) Barras de Peso 10) Bomba	1) Vástago de bombeo convencional 2) Cupla de vástago de 1" API a 1" conexión Premium 3) Varillas conexión Premium de 1" 4) Cross Over de 1" conexión Premium a 1" API (2 pies de largo) 5) Cupla de 1" API 6) Bomba

Anexo I – Evaluación del nivel de solicitaciones según la norma API 11 BR

La norma API 11BR recomienda la utilización del diagrama de Goodman modificado para la determinación del rango admisible de tensiones máximas y mínimas de trabajo para las varillas de bombeo.

El nivel de solicitación debe ser calculado siguiendo la siguiente fórmula:

$$S_{adm} = \left(\frac{UTS}{4} + 0.5625 \times S_{min} \right) \times SF$$

$$\%Goodman = \frac{(S_{m\acute{a}x} - S_{m\acute{i}n})}{(S_{adm} - S_{m\acute{i}n})} \times 100$$

S_{adm} : Máxima tensión admisible de trabajo (psi)

UTS (Ultimate Tensile Strength): Tensión de rotura de la varilla (Grade D=115 ksi)

S_{min} : Tensión mínima (psi)

$S_{m\acute{a}x}$: Tensión máxima (psi)

SF: Factor de Servicio

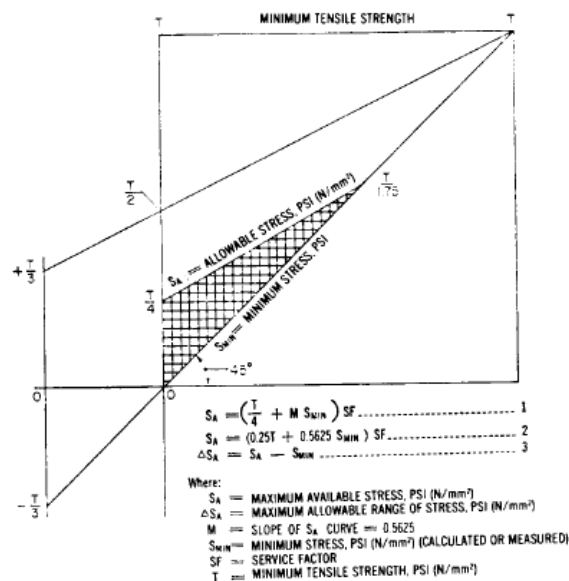


Diagrama de Goodman Modificado recomendado por API y rango de tensiones para las varillas de bombeo Grado D

Existen diferentes curvas dependiendo del Grado de acero que se utilice y de las especificaciones propias de cada fabricante.