

# **DEFORMACIONES ELÁSTICAS EN VARILLAS**

**Ing. Eduardo J. Dottore**

**Bolland & Cia S.A.**

Este trabajo fue preparado para ser presentado en el Foro Nacional sobre Varillas de Bombeo y Tubulares, Performances y Nuevas Tecnologías, organizado por la Seccional Cuyo del IAPG, en la Facultad de Ingeniería, UNC, Mendoza, Argentina, 19 y 20 de agosto de 2004.

## **SINOPSIS**

Un espaciamiento correcto es fundamental para la vida útil de la bomba y para garantizar el funcionamiento eficiente del sistema de bombeo mecánico. Lo que se busca con esta operación es establecer la posición relativa del pistón y de todo el subconjunto móvil dentro de la cámara de la bomba.

Es importante que los operadores de equipos de pulling reciban el valor de estiramiento esperable para las varillas del pozo en cuestión. Dicho estiramiento es función de parámetros tales como el diseño de la sarta, de la profundidad de la bomba, del tamaño de ésta, del tipo de fluido a elevar, del nivel estático y del nivel dinámico.

El objetivo de este trabajo es el de presentar al productor petrolero un criterio de cálculo que permita establecer cuáles son las deformaciones elásticas esperables en función de las solicitaciones a las que se somete a las sartas de varillas. No serán objeto de estudio las deformaciones plásticas permanentes que la sarta pueda sufrir (o haya sufrido) durante su vida útil debido a solicitaciones de tracción que hayan excedido el límite de fluencia del material.

## **INTRODUCCIÓN**

Finalizada la maniobra de bajada de la bomba, y luego de haber tocado en el fondo, se procederá a cargar sobre la bomba con aproximadamente 3000 libras (en el caso de anclaje simple) para que ancle en su correspondiente zapato o niple de anclaje. Una vez anclada la bomba, se estará en condiciones de espaciarla. El espaciamiento consiste en levantar a las varillas (y por ende al pistón y todo el subconjunto móvil de la bomba) una distancia equivalente a lo que se prevé será el estiramiento de la sarta bajo condiciones de funcionamiento estable del sistema. Un correcto espaciamiento es aquel con el que se logra un mínimo espacio nocivo en la cámara de la bomba, sin la presencia de golpe de bomba. Un espaciamiento incorrecto podría generar golpes hacia abajo o hacia arriba. Golpear la bomba hacia abajo generará un deterioro en principio en la parte

superior de la bomba. La guía de vástago (G11) será golpeada en cada carrera descendente por el manguito conector del vástago (B21). De mantenerse esta condición, estas piezas podrán sufrir tal deformación que comenzarán a golpear otras piezas en el interior de la bomba, como ser el tapón de jaula de válvula viajera con el techo de la jaula de válvula estacionaria, produciéndose así el deterioro irreversible y permanente de la bomba. Por otro lado, si el espaciado incorrecto provoca que la bomba golpee hacia arriba, además del deterioro de las piezas golpeadas se correrá el riesgo de que la bomba se desclave y genere las consiguientes pérdidas de producción. Por lo tanto un espaciado correcto es fundamental para la vida útil de la bomba y para garantizar una eficiencia de bombeo apropiada.

Para poder efectuar un espaciado en forma correcta se deberá contar con la información que Ingeniería de Producción deberá proveer acerca de los cálculos que indiquen cual es el estiramiento esperado de la sarta utilizada. Con el fin de colaborar en este objetivo, la Práctica Recomendada del API para los Cálculos de Diseño de Sistemas de Bombeo Mecánico (RP11L), hace referencia a distintos tipos de sargas telescópicas comúnmente utilizadas en la industria petrolera internacional. En la Tabla 4.1 de dicha práctica recomendada, se tabulan las distintas combinaciones para distintos tamaños de varillas, desde sargas simples hasta cuádruples. En la columna 3 de dicha tabla, se detalla el peso de varilla en el aire expresado en libras por pie de varilla. Es decir, multiplicando este valor por el largo de la sarga podemos calcular directamente el peso de la misma sea simple o de varios diámetros. A su vez, en la columna 4 de dicha práctica recomendada se detalla la constante elástica de cada tipo de sarga, expresado en pulgadas por cada libra de peso y pie de longitud de la sarga. Es decir, conocido el largo de la sarga y el peso de la misma (calculado con la información de la columna 3) se puede calcular cual sería el estiramiento estático de la sarga de varillas en el aire.

Pero uno de los inconvenientes que se presentan con este procedimiento es que muchas veces los operadores petroleros utilizan sargas que no responden al diseño del API y en ese caso no resulta aplicable la información brindada por dicha práctica recomendada. Tampoco se tiene en cuenta la práctica habitual de utilizar barras o varillas de peso, comúnmente empleadas en aquellas aplicaciones en las que el tramo inferior de la sarga entra en un estado de tensiones de compresión.

Debido entonces a las limitaciones que presenta la práctica recomendada RP11L, es que se desarrolla este criterio de cálculo estático para poder conocer de antemano cuales serían las deformaciones elásticas que podrán sufrir las varillas para una instalación determinada.

## DESARROLLO DEL CÁLCULO

Para facilitar la comprensión del desarrollo se analizará primero una sarta simple para luego extender el criterio de cálculo a sargas telescópicas. Los pasos que seguiremos serán los siguientes:

- 1- Cálculo del peso de la sarta
- 2- Cálculo de la deformación por peso propio
- 3- Cálculo de la flotación debido al nivel estático
- 4- Cálculo del peso de fluido
- 5- Cálculo de la deformación debido al peso de fluido (a nivel dinámico)
- 6- Cálculo de la flotación debido al tubing lleno (de nivel estático a superficie)
- 7- Cálculo de la deformación del tubing

Consideremos una instalación como la que se muestra en la Figura 1. A modo de ejemplo y para desarrollar los cálculos, consideremos que la sarta es simple y de 1" de diámetro.

- 1- Cálculo del peso de la sarta

De la columna 3 de la Tabla 4.1, página 9 de la RP11L se obtiene que el peso de varillas en libras por pie es  $W_r = 2.904 \text{ lb/pie}$ .

O sea que:

$$P_v = W_r \times P = 2.904 \text{ lb/pie} \times 3937 \text{ pies} = 11433 \text{ lb}$$

- 2- Cálculo de la deformación por peso propio

De la columna 4 de la Tabla 4.1 se obtiene la constante elástica de la varilla, cuyo valor es  $E_r = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie})$ . Adicionalmente, si observamos la Figura 2 veremos que el peso de las varillas se va incrementando desde el fondo hasta la superficie. Ello se debe a que la penúltima varilla del fondo recibe solo la carga de la última, la antepenúltima recibe el peso de dos varillas y así sucesivamente hasta que la varilla en superficie recibe el peso de todas las restantes que se encuentran por debajo de ella. Vale decir que este ordenamiento lineal de las cargas distribuidas generará deformaciones crecientes desde el fondo hacia la superficie. El efecto del peso propio en la deformación de la sarta, es equivalente al de una fuerza concentrada de la mitad de su intensidad aplicada en su extremo inferior, o sea:

$$D_{pv} = E_r \times P_v \times P/2 = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 11433 \text{ lb} \times 3937 \text{ pies} / 2$$
$$D_{pv} = 11.186 \text{ pulg}$$

### 3- Cálculo de la flotación debido al nivel estático

La porción de sarta que se sumerja en el nivel estático recibirá un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen de líquido que desaloja. El volumen de líquido desalojado es igual al volumen de la sarta que ingresa, y siendo que los pesos específicos del acero y del agua son  $7.8 \text{ kg/dm}^3$  y  $1 \text{ kg/dm}^3$  respectivamente, podemos calcular el peso de líquido por pie, el que será:

$$W_{ne} = W_r \times 1 \text{ kg/dm}^3 / 7.8 \text{ kg/dm}^3 = W_r / 7.8 = 2.904 \text{ l/pie} / 7.8 = 0.372 \text{ l/pie}$$

Por lo tanto la fuerza de flotación generada por el nivel estático será:

$$F_{ne} = W_{ne} \times (P - NE) = 0.372 \text{ l/pie} \times (3937 - 2297) \text{ pies} =$$
$$F_{ne} = 0.372 \text{ l/pie} \times 1640 \text{ pies} = 610.08 \text{ lb}$$

Este empuje genera una contracción en la varilla dado que actúa en forma opuesta al peso propio de la misma, por lo que lo consideraremos de signo negativo:

$$D_{ne} = - E_r \times F_{ne} \times (P - NE) / 2 =$$
$$D_{ne} = - 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg/(lb.pie)} \times 610.08 \text{ lb} \times 1640 \text{ pies} / 2 = - 0.249 \text{ pulg}$$

Vale decir que en el momento de anclar la bomba la sarta habrá experimentado un estiramiento igual a:

$$D_o = D_{pv} + D_{ne} = 11.186 \text{ pulg} - 0.249 \text{ pulg} = 10.937 \text{ pulg}$$

Este estado será tomado como referencia para poder calcular luego las deformaciones que se producen al comenzar a trabajar la bomba. Vale decir que las varillas ya deformadas por peso propio con una parte sumergida y otra en el aire será considerado como el estado inicial de la sarta (Figura 1). Desde el momento en que se arranque la bomba se irán produciendo deformaciones adicionales a medida que se llena la cañería de producción y se pasa del nivel estático al dinámico. Es decir, transcurrirá un período transitorio de estiramientos hasta llegar a la condición de la Figura 3, que es lo que nos proponemos calcular.

### 4- Cálculo del peso de fluido

Independientemente del tamaño del tubing, el peso de fluido será función directa de la sección de la bomba y de la presión hidrostática a la que se encuentra. Es decir, la carga de fluido será mayor cuanto más grande sea el diámetro de la bomba, cuanto más profundo se la ancle, y cuanto más cercano a la admisión de la bomba se encuentre el nivel dinámico. Para continuar con las unidades con las que venimos desarrollando el cálculo, utilizaremos la expresión planteada en la práctica recomendada RP11L, que dice:

$$F_o = 0.340 \times G \times D^2 \times H = 0.340 \times 1 \times 2.25^2 \text{ pulg}^2 \times 3281 \text{ pies} = 5647.42 \text{ lb}$$

#### 5- Cálculo de la deformación debido al peso de fluido (a nivel dinámico)

Si bien el peso del fluido es el que se obtiene de considerar la presión hidrostática a la altura del nivel dinámico, en realidad es una carga concentrada en el extremo de la sarta a la altura de la bomba o sea que produce la siguiente deformación:

$$D_{pf} = E_r \times F_o \times P = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 3937 \text{ pies} =$$

$$D_{pf} = 11.05 \text{ pulg}$$

#### 6- Cálculo de la flotación debido al tubing lleno (de nivel estático a superficie)

En el estado tomado como referencia ya se encontraba bajo consideración la flotación que genera el nivel estático sobre las varillas. Para completar ahora el desarrollo, se deberá calcular la fuerza de flotación que produce el fluido desde el nivel estático hasta la superficie. Esa fuerza de flotación será:

$$F_{sup} = W_{ne} \times NE = 0.372 \text{ lb/pie} \times 2297 \text{ pies} = 854.484 \text{ lb}$$

Este empuje genera una contracción en la varilla dado que actúa en forma opuesta al peso propio de la misma, por lo que lo consideraremos de signo negativo:

$$D_{sup} = - E_r \times F_{sup} \times NE / 2 =$$

$$D_{sup} = - 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 854.484 \text{ lb} \times 2297 \text{ pies} / 2 = - 0.488 \text{ pulg}$$

Vale decir que en el momento en que finaliza el transitorio la sarta habrá experimentado un estiramiento igual a:

$$D_{fi} = D_{pf} + D_{sup} = 11.050 \text{ pulg} - 0.488 \text{ pulg} = 10.562 \text{ pulg}$$

#### 7- Cálculo de la deformación del tubing

Superados los 1000 / 1200 metros de profundidad, es recomendable anclar el tubing. Si la cañería de producción estuviera anclada, el valor anterior representa al espaciamiento necesario para la situación considerada en el ejemplo. Pero si la cañería de producción no estuviera anclada, se deberá calcular la deformación que le genera la carga fluido. De la tabla 4.2, página 11 de la RP11L, se obtiene la constante elástica de los distintos tamaños de tubing. Considerando el caso de tener una instalación con tubing de 2 7/8" el valor de la constante elástica es  $E_t : 0.221 \times 10^{-6}$ , por lo que la deformación esperada será igual a:

$$D_{tpf} = E_t \times F_o \times P = 0.221 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 3937 \text{ pies} =$$

$$D_{tpf} = - 4.913 \text{ pulg}$$

Siendo que el tubing se carga cuando se descarga la sarta y viceversa, la deformación del tubing se opone a la de las varillas, de allí que se haya adoptado el signo negativo. Entonces el espaciamento necesario para el caso de tubing sin anclar será de:

$$Esp = D_{fi} + D_{tpf} = 10.562 \text{ pulg} - 4.913 \text{ pulg} = 5.649 \text{ pulg}$$

El análisis hasta aquí considerado corresponde al de una sarta simple. Veamos como se trata el tema cuando se trabaja con sartas telescópicas. Supongamos que al mismo ejemplo anterior le modificamos la sarta y colocamos el siguiente diseño:

- 30 % varillas de 1"
- 30 % varillas de 7/8"
- 30 % varillas de 3/4"
- 10 % varillas de 1"

Para calcular el peso de la sarta, se toma el peso de varillas en libras por pie de cada diámetro utilizado ( $W_r$  de la columna 3, Tabla 4.1, pagina 9 de la RP11L) y se lo multiplica por la longitud del tramo, o sea:

$$\begin{aligned} P_{v1} &= W_{r1} \times L_1 = 2.904 \text{ lb/pie} \times 1181.10 \text{ pies} = 3429.92 \text{ lb} \\ P_{v2} &= W_{r2} \times L_2 = 2.224 \text{ lb/pie} \times 1181.10 \text{ pies} = 2626.77 \text{ lb} \\ P_{v3} &= W_{r3} \times L_3 = 1.634 \text{ lb/pie} \times 1181.10 \text{ pies} = 1929.92 \text{ lb} \\ P_{v4} &= W_{r4} \times L_4 = 2.904 \text{ lb/pie} \times 393.70 \text{ pies} = 1143.31 \text{ lb} \end{aligned}$$

La deformación de cada tramo por peso propio se obtiene multiplicando la constante elástica de cada diámetro ( $E_r$  de la columna 4, Tabla 4.1) por el peso y largo del tramo, o sea:

$$\begin{aligned} D_{pv1} &= E_{r1} \times P_{v1} \times L_1 / 2 = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg/(lb.pie)} \times 3429.92 \text{ lb} \times 1181.10 \text{ pies} / 2 \\ D_{pv2} &= E_{r2} \times P_{v2} \times L_2 / 2 = 0.649 \times 10^{-6} \text{ pulg/(lb.pie)} \times 2626.77 \text{ lb} \times 1181.10 \text{ pies} / 2 \\ D_{pv3} &= E_{r3} \times P_{v3} \times L_3 / 2 = 0.883 \times 10^{-6} \text{ pulg/(lb.pie)} \times 1929.92 \text{ lb} \times 1181.10 \text{ pies} / 2 \\ D_{pv4} &= E_{r4} \times P_{v4} \times L_4 / 2 = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg/(lb.pie)} \times 1143.31 \text{ lb} \times 393.70 \text{ pies} / 2 \end{aligned}$$

A su vez, cada tramo genera una fuerza concentrada en el extremo inferior del tramo superior. Es decir, la varilla de peso de 1" genera una carga sobre la varilla de 3/4". A su vez la de 7/8" recibe la carga de los tramos de 1" y 3/4" y finalmente las varillas de 1" de arriba de todo, recibe la carga de los tramos de 1", 3/4" y 7/8", o sea:

$$\begin{aligned} Dpv_1' &= Dpv_1 + Er_1 \times (Pv_2 + Pv_3 + Pv_4) \times L_1 = 4.353 \text{ pulg} \\ Dpv_2' &= Dpv_2 + Er_2 \times (Pv_3 + Pv_4) \times L_2 = 3.362 \text{ pulg} \\ Dpv_3' &= Dpv_3 + Er_3 \times Pv_4 \times L_3 = 2.199 \text{ pulg} \\ Dpv_4 &= 0.112 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La deformación de la sarta será igual a la sumatoria de las deformaciones individuales de cada tramo, o sea:

$$Dpv = Dpv_1' + Dpv_2' + Dpv_3' + Dpv_4 = 10.026 \text{ pulg}$$

Como se dijo anteriormente, la porción de sarta que se sumerja en el nivel estático recibirá un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen de líquido que desaloja. El volumen de líquido desalojado es igual al volumen de la sarta que ingresa, y siendo que los pesos específicos del acero y del agua son  $7.8 \text{ kg/dm}^3$  y  $1 \text{ kg/dm}^3$  respectivamente, podemos calcular el peso de líquido por pie, el que será:

$$\begin{aligned} Wne_1 &= Wr_1 \times 1 \text{ kg/dm}^3 / 7.8 \text{ kg/dm}^3 = 2.904 \text{ lb/pie} / 7.8 = 0.372 \text{ lb/pie} \\ Wne_2 &= Wr_2 \times 1 \text{ kg/dm}^3 / 7.8 \text{ kg/dm}^3 = 2.224 \text{ lb/pie} / 7.8 = 0.285 \text{ lb/pie} \\ Wne_3 &= Wr_3 \times 1 \text{ kg/dm}^3 / 7.8 \text{ kg/dm}^3 = 1.634 \text{ lb/pie} / 7.8 = 0.209 \text{ lb/pie} \\ Wne_4 &= Wr_4 \times 1 \text{ kg/dm}^3 / 7.8 \text{ kg/dm}^3 = 2.904 \text{ lb/pie} / 7.8 = 0.372 \text{ lb/pie} \end{aligned}$$

Por lo tanto podemos calcular la fuerza de flotación generada por el fluido sobre la sarta hasta alcanzar el nivel estático. Vale decir, desde la profundidad de la bomba hasta el nivel estático, lo que podrá involucrar a más de un tramo de varillas pero, muy probablemente, no a todos. En este caso:

$$\text{Para } (P - NE) = 1640.42 \text{ pies} > L_4 = 393.70 \text{ pies}$$

$$Fne_4 = Wne_4 \times L_4 = 0.372 \text{ lb/pie} \times 393.70 \text{ pies} = 146.58 \text{ lb}$$

$$\text{Para } (P - NE) > L_4 + L_3 = 393.70 \text{ pies} + 1181.10 \text{ pies} = 1574.80 \text{ pies}$$

$$Fne_3 = Wne_3 \times L_3 = 0.209 \text{ lb/pie} \times 1181.10 \text{ pies} = 247.43 \text{ lb}$$

$$\text{Para } (P - NE) - (L_4 + L_3) = 65.62 \text{ pies}$$

$$Fne_2 = Wne_2 \times 65.62 \text{ pies} = 0.285 \text{ lb/pie} \times 65.62 \text{ pies} = 18.71 \text{ lb}$$

Este empuje genera una contracción en la sarta dado que actúa en forma opuesta al peso propio de la misma, por lo que lo consideraremos de signo negativo. La contracción de cada tramo se obtiene multiplicando la constante elástica de cada

diámetro ( $E_r$  de la columna 4, Tabla 4.1) por la fuerza de flotación y largo sumergido de cada tramo, o sea:

$$\begin{aligned} D_{ne_4} &= - E_{r_4} \times F_{ne_4} \times 393.70 \text{ pies} / 2 = 0.014 \text{ pulg} \\ D_{ne_3} &= - E_{r_4} \times F_{ne_3} \times 1181.10 \text{ pies} / 2 = 0.129 \text{ pulg} \\ D_{ne_2} &= - E_{r_2} \times F_{ne_2} \times 65.62 \text{ pies} / 2 = 0.0004 \text{ pulg} \end{aligned}$$

A su vez, cada tramo genera una fuerza de contracción en el extremo inferior del tramo superior. Es decir, la varilla de peso de 1" genera una fuerza de flotación sobre la varilla de  $\frac{3}{4}$ ". A su vez la de  $\frac{7}{8}$ " recibe la carga de los tramos de 1" y  $\frac{3}{4}$ ", o sea:

$$\begin{aligned} D_{ne_4} &= 0.014 \text{ pulg} \\ D_{ne_3}' &= D_{ne_3} + E_{r_3} \times F_{ne_4} \times L_3 = 0.282 \text{ pulg} \\ D_{ne_2}' &= D_{ne_2} + E_{r_2} \times (F_{ne_3} + F_{ne_4}) \times L_2 = 0.302 \text{ pulg} \\ D_{ne_1}' &= D_{ne_1} + E_{r_1} \times (F_{ne_2} + F_{ne_3} + F_{ne_4}) \times L_1 = 0.242 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La contracción de la sarta debido a la flotación de las varillas será igual a la sumatoria de las contracciones individuales de cada tramo, o sea:

$$D_{ne} = D_{ne_1}' + D_{ne_2}' + D_{ne_3}' + D_{ne_4} = - 0.841 \text{ pulg}$$

Vale decir que en el momento de anclar la bomba la sarta habrá experimentado un estiramiento igual a:

$$D_o = D_{pv} + D_{ne} = 10.026 \text{ pulg} - 0.841 \text{ pulg} = 9.185 \text{ pulg}$$

Tal como se dijo en el ejemplo anterior, este estado será tomado como referencia para poder calcular luego las deformaciones que se producen al comenzar a trabajar la bomba. Vale decir que las varillas ya deformadas por peso propio con una parte sumergida y otra en el aire será considerado como el estado inicial de la sarta. Desde el momento en que se arranque la bomba se irán produciendo deformaciones adicionales a medida que se llena la cañería de producción y se pasa del nivel estático al dinámico. Es decir, transcurrirá un período transitorio de estiramientos hasta llegar a la condición de cañería de producción llena, que es lo que nos proponemos calcular.

Como se dijo anteriormente el peso de fluido es función directa de la sección de la bomba y de la presión hidrostática a la que se encuentra, por lo que su valor es:

$$F_o = 0.340 \times G \times D^2 \times H = 0.340 \times 1 \times 2.25^2 \text{ pulg}^2 \times 3281 \text{ pies} = 5647.42 \text{ lb}$$

El peso del fluido es una carga concentrada en el extremo de la sarta a la altura de la bomba o sea que produce la siguiente deformación en cada uno de los tramos

$$Dpf_1 = Er_1 \times Fo \times L_1 = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 1181 \text{ pies}$$

$$Dpf_1 = 3.315 \text{ pulg}$$

$$Dpf_2 = Er_2 \times Fo \times L_2 = 0.649 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 1181 \text{ pies}$$

$$Dpf_2 = 4.329 \text{ pulg}$$

$$Dpf_3 = Er_3 \times Fo \times L_3 = 0.883 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 1181 \text{ pies}$$

$$Dpf_3 = 5.889 \text{ pulg}$$

$$Dpf_4 = Er_4 \times Fo \times L_4 = 0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 393.70 \text{ pies}$$

$$Dpf_4 = 1.105 \text{ pulg}$$

La deformación en toda la sarta será la sumatoria de la deformación de todos los tramos, o sea:

$$Dpf = Dpf_1 + Dpf_2 + Dpf_3 + Dpf_4 = 14.638 \text{ pulg}$$

Tal como se viera anteriormente, en el estado tomado como referencia ya se encontraba bajo consideración la flotación que genera el nivel estático sobre las varillas. Para completar ahora el desarrollo, se deberá calcular la fuerza de flotación que produce el fluido desde el nivel estático hasta la superficie. Esa fuerza de flotación será:

$$\text{Para NE} = 2296.59 \text{ pies} > L_1 = 1181.10 \text{ pies}$$

$$Fsup_1 = Wne_1 \times L_1 = 0.372 \text{ lb/pie} \times 1181.10 \text{ pies} = 439.73 \text{ lb}$$

$$\text{Para NE} - (L_1 + L_2) = 1115.49 \text{ pies}$$

$$Fsup_2 = Wne_2 \times L_2 = 0.285 \text{ lb/pie} \times 1115.49 \text{ pies} = 318.06 \text{ lb}$$

Este empuje genera una contracción en la varilla dado que actúa en forma opuesta al peso propio de la misma, por lo que lo consideraremos de signo negativo:

$$Dsup_1 = - Er_1 \times Fsup_1 \times 1181.10 \text{ pies} / 2 =$$

$$Dsup_1 = -0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 439.73 \text{ lb} \times 1181.10 \text{ pies}/2 = -0.129 \text{ pulg}$$

$$Dsup_2 = - Er_2 \times Fsup_2 \times 1115.49 \text{ pies} / 2 =$$

$$Dsup_2 = -0.497 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 318.06 \text{ lb} \times 1115.49 \text{ pies}/2 = -0.115 \text{ pulg}$$

A su vez, cada tramo genera una fuerza contracción en el extremo inferior del tramo superior.

$$\begin{aligned} D_{sup_1}' &= - [D_{sup_1} + E_{r_1} \times F_{sup_2} \times 1181.10 \text{ pies}] = - 0.316 \text{ pulg} \\ D_{sup_2} &= - 0.115 \text{ pulg} \end{aligned}$$

La contracción total será la sumatoria de las deformación de todos los tramos, o sea:

$$D_{sup} = D_{sup_1}' + D_{sup_2} = - 0.431 \text{ pulg}$$

Vale decir que en el momento en que finaliza el transitorio la sarta habrá experimentado un estiramiento igual a:

$$D_{fi} = D_{pf} + D_{sup} = 14.638 \text{ pulg} - 0.431 \text{ pulg} = 14.207 \text{ pulg}$$

Como en el caso de sarta simple, si el tubing no estuviera anclado tendría una deformación igual a:

$$\begin{aligned} D_{tpf} &= E_t \times F_o \times P = 0.221 \times 10^{-6} \text{ pulg}/(\text{lb.pie}) \times 5647.42 \text{ lb} \times 3937 \text{ pies} = \\ D_{tpf} &= - 4.913 \text{ pulg} \end{aligned}$$

Siendo que el tubing se carga cuando se descarga la sarta y viceversa, la deformación del tubing se opone a la de las varillas, de allí que se haya adoptado el signo negativo. Entonces el espaciamiento necesario para el caso de tubing sin anclar será de:

$$Esp = D_{fi} + D_{tpf} = 14.207 \text{ pulg} - 4.913 \text{ pulg} = 9.294 \text{ pulg}$$

Nótese que si el tubing estuviese anclado, solamente por cambiar el diseño de la sarta de simple a cuádruple (es decir sin cambiar el resto de los parámetros del sistema) se incrementa el estiramiento de 10.562 pulgadas a 14.207 pulgadas.

Si consideráramos una aplicación más profunda manteniendo el mismo diseño de varillas (es decir los mismo diámetros y porcentajes de varillas por tramo) notaríamos como se incrementa el estiramiento en función de la profundidad. No se incluyen en el presente trabajo por razones de extensión, pero haciendo los cálculos para una profundidad de 9842 pies (3000 m), con un nivel dinámico de 9186 pies (2800 m) y un nivel estático de 7874 pies (2400 m), la varilla sufre un estiramiento de 97.864 pulgadas (2,48 metros).

Si consideramos al caso anterior pero con sarta API 86 y hacemos los cálculos para una profundidad de 8460.30 pies (2578.70 m), con un nivel dinámico de 7500 pies (2286 m) y un nivel estático de 4921.26 pies (1500 m), la varilla sufre un estiramiento de 69.685 pulgadas (1,770 metros). Este es un caso real que muestra la magnitud de las deformaciones en las varillas en aplicaciones de gran profundidad.

Una recomendación (no siempre aceptada por las compañías productoras) para tener en cuenta en el momento de espaciar un pozo profundo y con niveles más cerca del fondo que de la superficie, es la de llenar la cañería de producción con agua previo al arranque de la bomba. De esta manera toda la sarta estaría sumergida en el fluido, todas las varillas sufrirían la flotación, el fluido ya estaría cargando sobre la bomba, y la única carga a tener en cuenta en el momento de calcular el espaciamiento es la que se genera al pasar del nivel estático al nivel dinámico. Aplicando este procedimiento al caso recién planteado, el espaciamiento necesario se obtiene de restar el estiramiento debido a la carga que genera el fluido en condiciones de nivel dinámico menos el estiramiento debido a la carga que genera el fluido en condiciones de nivel estático, o sea:

$$Dpf_{nd} = Dpf_{1nd} + Dpf_{2nd} + Dpf_{3nd} + Dpf_{4nd} = 71.682 \text{ pulg}$$

$$Dpf_{ne} = Dpf_{1ne} + Dpf_{2ne} + Dpf_{3ne} + Dpf_{4ne} = 47.035 \text{ pulg}$$

$$Esp = Dpf_{nd} - Dpf_{ne} = 71.682 \text{ pulg} - 47.035 \text{ pulg} = 24.647 \text{ pulg}$$

Con lo que se verifica que el espaciamiento se reduce a sólo 24.647 pulgadas (0,626 metros).

## CONCLUSIÓN

El estiramiento de una sarta de varillas puede llegar a tener magnitudes muy importantes como para no tenerlas en cuenta en el momento de espaciar una bomba de accionamiento mecánico.

El criterio de cálculo de las deformaciones elásticas esperables presentado en este trabajo, es de fácil aplicación y de suma utilidad para tener una aproximación al valor real. La utilización de una planilla de cálculos donde se vuelque el criterio detallado, permite efectuar múltiples simulaciones que ayudan a tomar decisiones apropiadas en el momento de efectuar el espaciamiento.

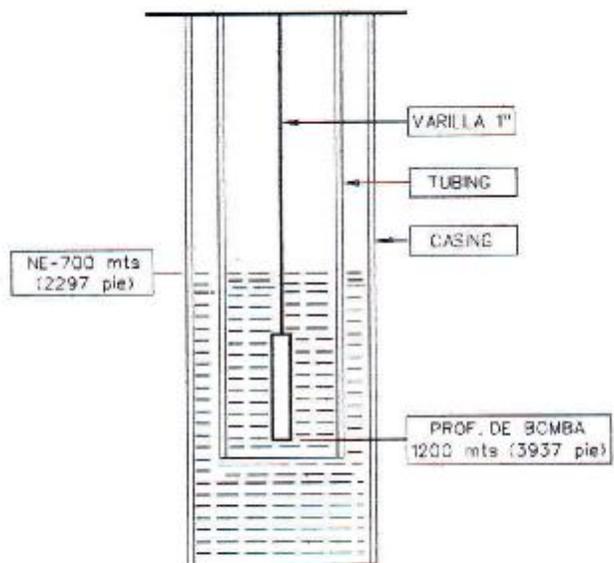


Figura 1

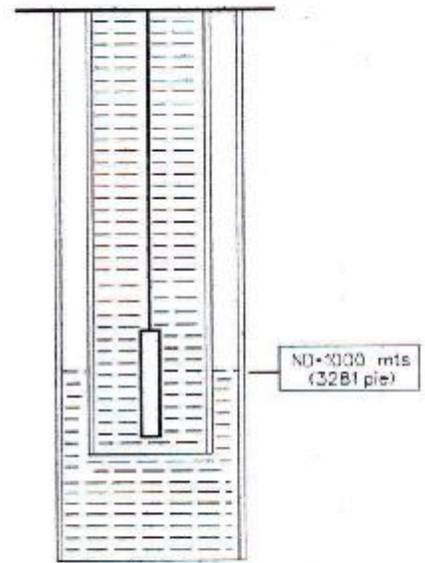


Figura 3

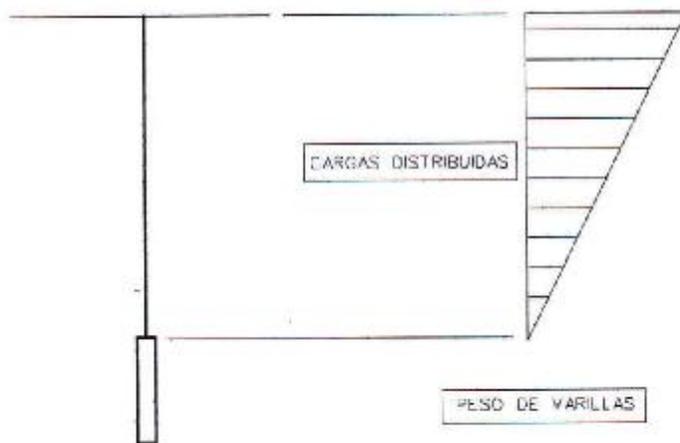


Figura 2

TABLE 4.1 (Continued)  
See Par. 4.5.

1 Rod No.	2 Plunger Diam., inches <i>D</i>	3 Rod Weight, lb per ft <i>W</i>	4 Elastic Constant, in. per lb ft <i>E</i>	5 Frequency Factor, <i>F<sub>c</sub></i>	6-11 Rod String, % of each size					
					6 1 1/2	7 1	8 3/4	9 5/8	10 1/2	11 3/8
86	1.06	2.058	0.742 x 10 <sup>-6</sup>	1.151	.....	22.6	23.0	54.3	.....	.....
86	1.25	2.087	0.732 x 10 <sup>-6</sup>	1.156	.....	24.3	24.5	51.2	.....	.....
86	1.50	2.133	0.717 x 10 <sup>-6</sup>	1.162	.....	26.8	27.0	48.3	.....	.....
86	1.75	2.185	0.699 x 10 <sup>-6</sup>	1.164	.....	29.4	30.0	40.6	.....	.....
86	2.00	2.247	0.679 x 10 <sup>-6</sup>	1.161	.....	32.8	33.2	33.9	.....	.....
86	2.25	2.315	0.656 x 10 <sup>-6</sup>	1.153	.....	36.9	36.0	27.1	.....	.....
86	2.50	2.385	0.633 x 10 <sup>-6</sup>	1.138	.....	40.6	39.7	19.7	.....	.....
86	2.75	2.456	0.610 x 10 <sup>-6</sup>	1.119	.....	44.5	43.3	12.2	.....	.....
87	1.06	2.390	0.612 x 10 <sup>-6</sup>	1.055	.....	24.3	75.7	.....	.....	.....
87	1.25	2.399	0.610 x 10 <sup>-6</sup>	1.058	.....	25.7	74.3	.....	.....	.....
87	1.50	2.413	0.607 x 10 <sup>-6</sup>	1.062	.....	27.7	72.3	.....	.....	.....
87	1.75	2.430	0.603 x 10 <sup>-6</sup>	1.066	.....	30.3	69.7	.....	.....	.....
87	2.00	2.450	0.598 x 10 <sup>-6</sup>	1.071	.....	33.2	66.8	.....	.....	.....
87	2.25	2.472	0.594 x 10 <sup>-6</sup>	1.075	.....	36.4	63.6	.....	.....	.....
87	2.50	2.496	0.588 x 10 <sup>-6</sup>	1.079	.....	39.9	60.1	.....	.....	.....
87	2.75	2.523	0.582 x 10 <sup>-6</sup>	1.082	.....	43.9	56.1	.....	.....	.....
87	3.25	2.575	0.570 x 10 <sup>-6</sup>	1.084	.....	51.6	48.4	.....	.....	.....
87	3.75	2.641	0.556 x 10 <sup>-6</sup>	1.078	.....	61.2	38.8	.....	.....	.....
87	4.75	2.793	0.522 x 10 <sup>-6</sup>	1.038	.....	83.6	16.4	.....	.....	.....
88	All	2.904	0.497 x 10 <sup>-6</sup>	1.000	.....	100.0	.....	.....	.....	.....
96	1.06	2.382	0.670 x 10 <sup>-6</sup>	1.222	19.1	19.2	19.5	42.3	.....	.....
96	1.25	2.435	0.655 x 10 <sup>-6</sup>	1.224	20.5	20.5	20.7	38.3	.....	.....
96	1.50	2.511	0.633 x 10 <sup>-6</sup>	1.223	22.4	22.5	22.8	32.3	.....	.....
96	1.75	2.607	0.606 x 10 <sup>-6</sup>	1.213	24.8	25.1	25.1	25.1	.....	.....
96	2.00	2.703	0.578 x 10 <sup>-6</sup>	1.196	27.1	27.9	27.4	17.6	.....	.....
96	2.25	2.806	0.549 x 10 <sup>-6</sup>	1.172	29.6	30.7	29.8	9.8	.....	.....
97	1.06	2.645	0.568 x 10 <sup>-6</sup>	1.120	19.6	20.0	60.3	.....	.....	.....
97	1.25	2.670	0.563 x 10 <sup>-6</sup>	1.124	20.8	21.2	58.0	.....	.....	.....
97	1.50	2.707	0.556 x 10 <sup>-6</sup>	1.131	22.5	23.0	54.5	.....	.....	.....
97	1.75	2.751	0.548 x 10 <sup>-6</sup>	1.137	24.5	25.0	50.4	.....	.....	.....
97	2.00	2.801	0.538 x 10 <sup>-6</sup>	1.141	26.8	27.4	45.7	.....	.....	.....
97	2.25	2.856	0.528 x 10 <sup>-6</sup>	1.143	29.4	30.2	40.4	.....	.....	.....
97	2.50	2.921	0.515 x 10 <sup>-6</sup>	1.141	32.5	33.1	34.4	.....	.....	.....
97	2.75	2.989	0.503 x 10 <sup>-6</sup>	1.135	36.1	35.3	28.6	.....	.....	.....
97	3.25	3.132	0.475 x 10 <sup>-6</sup>	1.111	42.9	41.9	15.2	.....	.....	.....
98	1.06	3.068	0.475 x 10 <sup>-6</sup>	1.043	21.2	78.8	.....	.....	.....	.....
98	1.25	3.076	0.474 x 10 <sup>-6</sup>	1.045	22.2	77.8	.....	.....	.....	.....
98	1.50	3.089	0.472 x 10 <sup>-6</sup>	1.048	23.8	76.2	.....	.....	.....	.....
98	1.75	3.103	0.470 x 10 <sup>-6</sup>	1.051	25.7	74.3	.....	.....	.....	.....
98	2.00	3.118	0.468 x 10 <sup>-6</sup>	1.055	27.7	72.3	.....	.....	.....	.....
98	2.25	3.137	0.465 x 10 <sup>-6</sup>	1.058	30.1	69.9	.....	.....	.....	.....
98	2.50	3.157	0.463 x 10 <sup>-6</sup>	1.062	32.7	67.3	.....	.....	.....	.....
98	2.75	3.180	0.460 x 10 <sup>-6</sup>	1.066	35.6	64.4	.....	.....	.....	.....
98	3.25	3.231	0.453 x 10 <sup>-6</sup>	1.071	42.2	57.8	.....	.....	.....	.....
98	3.75	3.289	0.445 x 10 <sup>-6</sup>	1.074	49.7	50.3	.....	.....	.....	.....
98	4.75	3.412	0.428 x 10 <sup>-6</sup>	1.064	65.7	34.3	.....	.....	.....	.....
99	All	3.676	0.393 x 10 <sup>-6</sup>	1.000	100.0	.....	.....	.....	.....	.....

**TABLE 4.2  
TUBING DATA**

1	2	3	4	5
Tubing Size	Outside Diameter, in.	Inside Diameter, in.	Metal Area, sq. in.	Elastic Constant, in. per lb ft $E_t$
1.900	1.900	1.610	0.800	$0.500 \times 10^{-6}$
2%	2.375	1.995	1.304	$0.307 \times 10^{-6}$
2%	2.875	2.441	1.812	$0.221 \times 10^{-6}$
3%	3.500	2.992	2.590	$0.154 \times 10^{-6}$
4	4.000	3.476	3.077	$0.130 \times 10^{-6}$
4%	4.500	3.958	3.601	$0.111 \times 10^{-6}$