



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN LA VIGA PRINCIPAL DE APARATOS INDIVIDUALES DE BOMBEO MECÁNICO DE PETRÓLEO

Gustavo G. Vignolo^{1,2}, Marcos J. Gregorio^{2,4}, José A. Vázquez³ y Daniel O. Barilá¹

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Ruta Prov. Nº 1, Km. 4, (9000) Comodoro Rivadavia, Argentina

² Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) – Universidad Nacional del Sur – CONICET Camino La Carrindanga km. 7 – CC 717, (8000) Bahía Blanca, Argentina –
e-mail: gvignolo@plapiqui.edu.ar

³ Departamento de Desarrollo Técnico, Tecnología en Sistemas y Servicios S.R.L.
Álvarez Jonte 158, Km. 5, (9000) Comodoro Rivadavia, Argentina

⁴ Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253, (8000) Bahía Blanca, Argentina

RESUMEN

Los Aparatos Individuales de Bombeo Mecánico (AIBMs) proporcionan el método de extracción de crudo más ampliamente utilizado en los yacimientos argentinos y en gran parte del mundo. Son los encargados de imprimir el movimiento necesario para el funcionamiento de una bomba alternativa situada en el subsuelo con la finalidad de elevar los fluidos desde el fondo del pozo hasta la superficie. La transmisión de dicho movimiento se realiza mediante una sarta de varillas de bombeo. Los AIBMs más ampliamente utilizados son los de tipo balancín, en los cuales el movimiento alternativo vertical se produce vinculando la sarta con el extremo de una viga que pivota en una articulación, actuando como una palanca. Para que el movimiento generado sea vertical puro, el extremo de dicha viga tiene un agregado con forma de sector de circunferencia, conocido como “cabeza de mula”, de radio igual a la distancia entre este extremo y el pivote o articulación. La sarta se conecta a la cabeza en su parte superior mediante cables flexibles que le permiten copiar la curvatura de la misma conforme esta asciende y desciende. En este trabajo se analizan los esfuerzos sobre la viga principal de un AIBM, con el objetivo de poder relacionar directamente la deformación en la viga con la carga que recibe de la sarta. Al esfuerzo principal de flexión y los esfuerzos normales secundarios debido a la inclinación que toma dicha viga, se añaden los esfuerzos normales y flectores relacionados con el anclaje de los cables a la cabeza. Para estos últimos, se propone un mecanismo de transmisión de carga en función del ángulo de inclinación de la viga. Los resultados analíticos son comparados con mediciones experimentales de deformación en AIBMs en funcionamiento.

Palabras Claves: Aparato de Bombeo de Petróleo, Modelo de Euler.

1. INTRODUCCIÓN

El bombeo mecánico de petróleo es el método de extracción de crudo más ampliamente utilizado en los yacimientos argentinos y en gran parte del mundo. Se basa, fundamentalmente, en una bomba de pistón dispuesta en el fondo de un pozo (de varios centenares de metros de profundidad) que recibe el movimiento alternativo generado por un aparato individual de bombeo mecánico (AIBM) situado en la superficie. La transmisión de movimiento desde la superficie al fondo del pozo se hace mediante una sucesión de varillas de bombeo unidas entre sí, conocida usualmente como sarta [1]. La principal variable de interés para el conocimiento del funcionamiento en un sistema de este tipo es la carga que se mueve en cada embolada de la bomba. Es decir, la fuerza que debe aplicar el AIBM para impulsar a la sarta y la columna de fluido. Del valor de carga se infiere el estado productivo del sistema, así como los esfuerzos sobre los elementos mecánicos que componen al AIBM. En particular resulta de interés en este trabajo el análisis de la viga principal del equipo ya que, por un lado, puede emplearse su deformación como medio efectivo para inferir la carga sobre el vástago [2, 3] y, por otro, es el elemento mecánico donde suelen presentarse fallas mecánicas (fisuras) que desencadenan un proceso muy costoso hasta la nueva puesta en producción del pozo [4, 5].

En el presente trabajo se desarrolla el estudio de los esfuerzos (y deformaciones) sobre la viga principal de los Aparatos Individuales de Bombeo Mecánico (AIBMs) producto de la carga ejercida por el vástago sobre el mismo. El principal objetivo es la búsqueda de la relación entre la deformación observada sobre la viga y la carga sobre el vástago. En primera instancia se considera la influencia del propio principio de funcionamiento, para mencionar luego factores o defectos de fabricación o montaje que pudiesen inducir esfuerzos adicionales.

Para el estudio se analiza el funcionamiento de un AIBM como el mostrado en la Fig. 1. F y u son la fuerza y el desplazamiento, respectivamente, que conforman la carta dinamométrica de superficie. Tanto F como u son impresos sobre el vástago por el AIBM a través de un cable que lo vincula con un anclaje situado en la parte superior de la cabeza [1, 6].

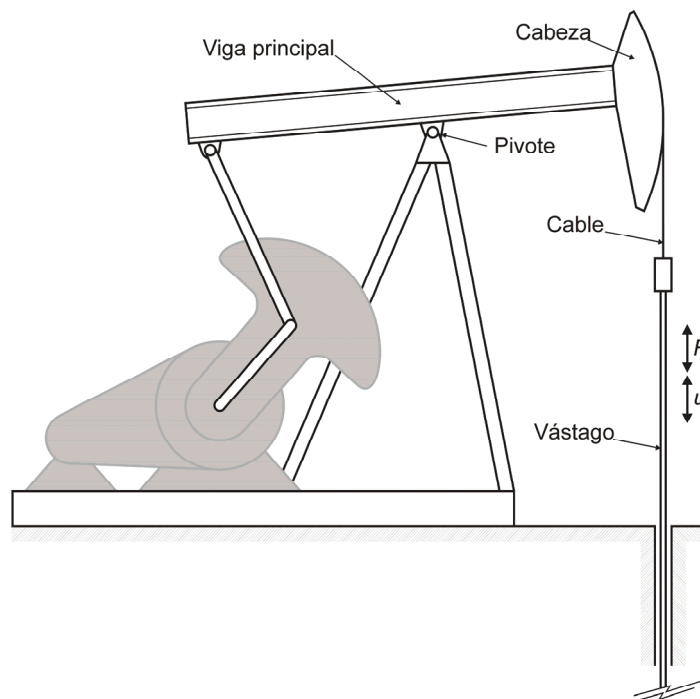


Figura 1: Esquema de un AIBM

Para que el vástago ascienda y descienda verticalmente, la cabeza tiene forma de sector de cilindro con centro en el pivote de la viga. Esto produce que en el punto en que la cabeza se encuentra en su posición más alta el cable quede apoyado sobre la misma desde el anclaje hasta la altura del pivote. En la posición más baja, el cable queda sostenido del anclaje sin apoyarse sobre la cabeza. Estas dos situaciones pueden verse en la Fig. 2.



Figura 2: Acción del cable sobre la cabeza. Izq: cable apoyado sobre la cabeza; Der: cable soportado sólo por el anclaje

2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS SOBRE LA VIGA: PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Para considerar el efecto que la interacción entre el cable y la cabeza producen sobre los esfuerzos en la viga, se propone el esquema de la Fig. 3. En la misma puede verse que sobre el anclaje actúa una fuerza F_0 y que el contacto entre el cable y la superficie curva produce una distribución de fuerza normal a la misma de resultante n , así como una distribución de fuerza de fricción de resultante f . A es el radio del sector de cilindro, Θ es el ángulo de contacto entre superficie-cable, y ε_v es la inclinación de la viga respecto de la horizontal.

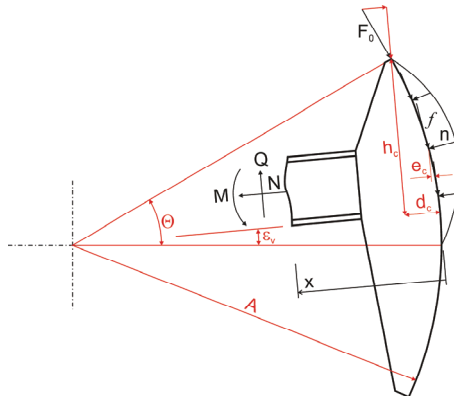


Figura 3: Esquema de interacción entre cable y cabeza: F_0 , f y n son las fuerzas ejercidas por el cable sobre la cabeza

Si se analizan los esfuerzos actuantes sobre la viga, corte Q, normal N y momento flector M a una distancia x de la superficie curva, se obtiene:

$$\begin{aligned}
 N &= -n \cos\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) + f \sin\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) + F_0 \sin(\Theta - \varepsilon_v) \\
 Q &= n \sin\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) + f \cos\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) + F_0 \cos(\Theta - \varepsilon_v) \\
 M &= F_0 \sin(\Theta - \varepsilon_v) h_c + f \cos\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) (x - e_c) + F_0 \cos(\Theta - \varepsilon_v) (x - d_c)
 \end{aligned} \tag{1}$$

donde

$$d_c = A(1 - \cos(\Theta - \varepsilon_v)) ,$$

$$e_c = A \left(1 - \cos\left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) \right) , y$$

$$h_c = A \sin(\Theta - \varepsilon_v)$$

El ángulo ε_v surge de analizar la cinemática del AIBM que se presentará posteriormente.

2.1 Interacción cable-cabeza

El estudio del contacto entre el cable y la superficie curva se efectúa siguiendo el análisis de Euler para transmisiones por correas [7], ilustrado en la Fig. 4.

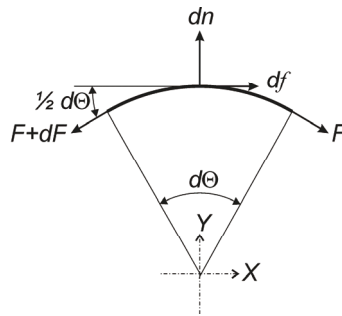


Figura 4: Diagrama de las fuerzas actuantes sobre el cable al contacto con la cabeza

Si se realiza la sumatoria de fuerzas en el elemento de cable en estudio, se tiene:

$$X \rightarrow df + F \cos\left(\frac{d\Theta}{2}\right) - (F + dF) \cos\left(\frac{d\Theta}{2}\right) = 0 = df - dF \cos\left(\frac{d\Theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$Y \rightarrow dn - F \sin\left(\frac{d\Theta}{2}\right) - (F + dF) \sin\left(\frac{d\Theta}{2}\right) = 0 = dn - 2F \sin\left(\frac{d\Theta}{2}\right) - dF \sin\left(\frac{d\Theta}{2}\right)$$

Al considerar las relaciones para ángulos pequeños y despreciar los términos de orden superior

$$\sin\left(\frac{d\Theta}{2}\right) \approx \frac{d\Theta}{2} , \quad \cos\left(\frac{d\Theta}{2}\right) \approx 1 , y \quad d\Theta dF \approx 0 , \quad (3)$$

y definiendo la fuerza de fricción como $df = \mu dn$ (donde μ es el coeficiente de fricción estático), las Ecs. (2) se reducen a

$$X \rightarrow 0 = \mu dn - dF \quad (4)$$

$$Y \rightarrow 0 = dn - F d\Theta$$

La solución de las Ecs. (4) brindan los resultados de F y n necesarios en las Ecs. (1). Resolviendo para F , con la condición de borde $\Theta=0 \rightarrow F=F_0$, se obtiene

$$\mu d\Theta = \frac{dF}{F} \Rightarrow F = F_0 e^{\mu\Theta} \quad (5)$$

La Ec. (5) se conoce como fórmula de Euler para correas. Resolviendo para n con la condición de borde $\Theta=0 \rightarrow n=0$, se obtiene

$$dn = F d\Theta \Rightarrow n = \frac{F_0}{\mu} (e^{\mu\Theta} - 1) \quad (6)$$

3. ANÁLISIS DE ESFUERZOS SOBRE LA VIGA: FACTORES EXTERNOS

Análisis de fallas en equipos de estas características han concluido que es posible la existencia de factores externos al propio principio de funcionamiento que pueden inducir cargas sobre sus componentes [4, 5].

Entre estos factores, pueden citarse como los más importantes a las desalineaciones durante la instalación del equipo en la locación del pozo y/o desalineaciones internas del equipo durante la construcción.

3.1. Desalineación durante la instalación del equipo en la locación del pozo

Si ocurriese que el eje de la base del equipo estuviera desplazado de la boca del pozo, se produciría una fuerza lateral en la "cabeza de mula", y el correspondiente esfuerzo flector transversal. Además, dado que la citada fuerza no pasaría por el eje geométrico de la viga salvo en algún momento particular, ocasionaría también torsión sobre la misma. No obstante, dado que la conexión entre la boca del pozo y el AIBM se efectúa a través de un medio muy flexible (Fig. 2), para que este esfuerzo fuese importante la desalineación también debería serlo.

Si bien la anomalía descrita podría generar un estado tensional más complejo en la viga, su magnitud no debería ser muy significativa ya que ni la fuerza lateral ni la excentricidad de la carga respecto del eje de la viga lo son [5].

3.2. Desalineaciones internas del equipo durante la construcción

Si existiese alguna desalineación interna del equipo, sería causante de esfuerzos internos durante su funcionamiento. Del análisis del mecanismo surge la posibilidad de que el eje geométrico del soporte que contiene al pivote no esté paralelo al soporte de las bielas. Esta desalineación produciría que la fuerza transmitida por cada una de éstas sea distinta, ejerciendo torsión en la viga de manera similar a la que se produciría si las manivelas conectadas al eje de baja velocidad no estuvieran alineadas. Además, dado que las bielas no trabajan perpendiculares a la viga, una desigualdad de fuerzas como la mencionada provocaría flexión lateral en la misma.

Este fenómeno produce cargas cíclicas importantes sobre la estructura y ha sido identificado como el posible disparador de fallas en algunos equipos [4, 5]. Asimismo, se estima que su existencia podría inferirse al comparar las mediciones de carga tomadas sobre el vástago, y las correspondientes a la deformación de la viga.

4. CINEMÁTICA DE LOS AIBM:

Existen diferentes tipos de AIBM, todos ellos tienen básicamente los mismos componentes, pero cambia la disposición geométrica de los mismos. Los más usuales son [1]: Convencional, Mark II, Air-Balanced y Torquemaster. Este trabajo se enfoca principalmente en los tipos Convencional y Mark II, pero puede extenderse a los otros tipos. Independientemente de la clase de AIBM que se analice, el desplazamiento s está relacionado con el movimiento de la viga principal, regido por el ángulo ψ comprendido entre la viga misma y la línea K que une el centro del reductor con el pivote fijo de la viga, tal como se muestra en la Figura 5.

En la posición más baja de la cabeza, donde $s=0$, ψ toma el valor ψ_b , y en la posición más alta, donde $s=s_{max}$ toma el valor ψ_t .

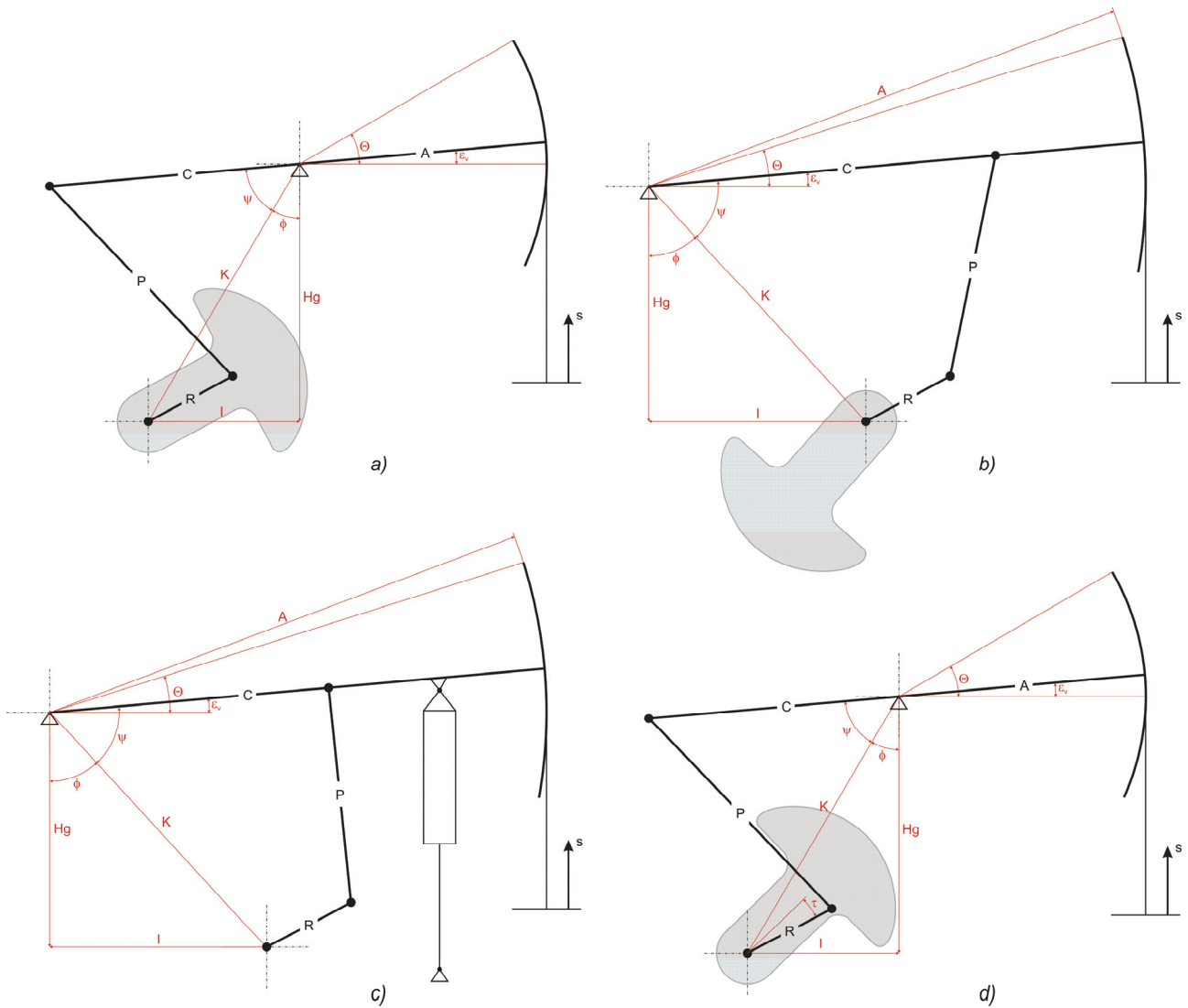


Figura 5: Esquema de la geometría de AIBMs: a) Convencional, b) Mark II, c) Air Balanced, y d) Torquemaster

La Tabla 1 muestra un resumen de las expresiones analíticas que gobiernan el movimiento de cada tipo de AIBM. La deducción de las mismas se logra mediante el análisis de la geometría de cada tipo de AIBM, mostrada en la Fig. 5. Más detalle sobre su desarrollo puede encontrarse en [1,8], junto con otras expresiones de utilidad para el análisis cinemático de equipos de bombeo.

Tabla 1: Resumen de expresiones cinemáticas para AIBMs

Parámetro	Tipo de AIBM		
	Convencional y Torquemaster	Mark II	Air Balanced
ψ_b	$\arccos \left[\frac{K^2 + C^2 - (P+R)^2}{2KC} \right]$	$\arccos \left[\frac{K^2 + C^2 - (P-R)^2}{2KC} \right]$	
ψ_t	$\arccos \left[\frac{K^2 + C^2 - (P-R)^2}{2KC} \right]$	$\arccos \left[\frac{K^2 + C^2 - (P+R)^2}{2KC} \right]$	
Θ	$(\psi_b - \psi_t) \frac{s}{s_{\max}} = \frac{s}{A}$	$(\psi_t - \psi_b) \frac{s}{s_{\max}} = \frac{s}{A}$	
ψ	$\psi_b - \frac{s}{A}$		$\psi_b + \frac{s}{A}$

Puede apreciarse en la Fig. 5 que, para el AIBM Convencional,

$$\varepsilon_v = \frac{\pi}{2} - \psi - \phi \quad (7)$$

Para el Mark II, la Ec.(7) se convierte en $\varepsilon_v = -\left(\frac{\pi}{2} - \psi - \phi\right)$

El resultado de la resta $\Theta - \varepsilon_v$ es un ángulo constante entre el punto más alto de la cabeza y la superficie inferior de la viga, Θ_{ε} (Θ_{ε_c} para el tipo Convencional, y Θ_{ε_M} para el Mark II). Por su lado, la resta $\Theta / 2 - \varepsilon_v$ puede reescribirse en función del ángulo constante citado, resultando para el tipo Convencional

$$\begin{aligned} (\Theta - \varepsilon_v) &= \phi + \psi_b - \frac{\pi}{2} = \Theta_{\varepsilon_c}, \quad y \\ \left(\frac{1}{2}\Theta - \varepsilon_v\right) &= \phi + \psi_b - \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2}\Theta = \Theta_{\varepsilon_c} - \frac{1}{2}\Theta \end{aligned} \quad (8)$$

Para el Mark II, las Ecs. (8) son válidas considerando que $\Theta_{\varepsilon_M} = -\Theta_{\varepsilon_c}$.

5. TENSIONES Y DEFORMACIONES

Si se reemplazan las Ecs. (5-8) en (1), se pueden determinar los esfuerzos de corte, normal y momento flector sobre cualquier sección de la viga entre la cabeza y el pivote o la manivela según se trate de un equipo tipo Convencional o Mark II. Para una posición $x=aA$ de la cabeza, los esfuerzos pueden escribirse como:

$$\begin{aligned} N &= F_0 \left[\frac{(e^{\mu\Theta} - 1)}{\mu} \left(-\cos\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) + \mu \sin\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) \right) + \sin(\Theta_{\varepsilon}) \right] \\ Q &= F_0 \left[\frac{(e^{\mu\Theta} - 1)}{\mu} \left(\sin\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) + \mu \cos\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) \right) + \cos(\Theta_{\varepsilon}) \right] \\ M &= F_0 A \left[1 + (e^{\mu\Theta} - 1) \cos^2\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) + (a-1) \left((e^{\mu\Theta} - 1) \cos\left(\Theta_{\varepsilon} - \frac{1}{2}\Theta\right) + \cos(\Theta_{\varepsilon}) \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

Puede verse en las Ecs. (9) que tanto en el esfuerzo normal como en el de corte, las diferencias entre los diversos tipos de AIBM se manifiesta únicamente a través del valor de Θ_{ε} , siempre que se considere una sección de la viga entre la cabeza y el primer vínculo de la misma con la estructura (pivote o manivela). En el caso del momento flector debe considerarse, además, el valor de a según el AIBM considerado. Los valores de a para cada caso son:

$$\begin{aligned} \text{Convencional} &\rightarrow a = 1 \\ \text{Mark II} &\rightarrow a = \frac{C-A}{A} < 1 \end{aligned} \quad (10)$$

donde $(C-A)$ es la distancia entre la cabeza y el pivote de acuerdo a la nomenclatura de [1, 8]. La sección de la viga, en el tramo mencionado, con mayor deformación será aquella de mayor momento flector. Así, para un equipo Convencional será aquella situada sobre el pivote, mientras que para un Mark II es la situada sobre el anclaje de la manivela.

Si se escriben las Ecs. (9) en función de la fuerza sobre el vástago, F , y la posición del mismo, s , se tiene:

$$\begin{aligned}
 N &= F \left[\frac{\left(1 - e^{-\frac{\mu s}{A}}\right)}{\mu} \left(-\cos\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) + \mu \sin\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) \right) + e^{-\frac{\mu s}{A}} \sin(\Theta_\varepsilon) \right] \\
 Q &= F \left[\frac{\left(1 - e^{-\frac{\mu s}{A}}\right)}{\mu} \left(\sin\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) + \mu \cos\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) \right) + e^{-\frac{\mu s}{A}} \cos(\Theta_\varepsilon) \right] \\
 M &= FA \left[e^{-\frac{\mu s}{A}} + \left(1 - e^{-\frac{\mu s}{A}}\right) \cos^2\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) + (a-1) \left(e^{-\frac{\mu s}{A}} \cos(\Theta_\varepsilon) + \left(1 - e^{-\frac{\mu s}{A}}\right) \cos\left(\Theta_\varepsilon - \frac{1 s}{2 A}\right) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{11}$$

A pesar de la dificultad aparente de las Ecs. (11), se verá posteriormente que pueden ser aproximadas muy fielmente con funciones lineales.

Dado que las tensiones (y sus consecuentes deformaciones) de interés en este trabajo radican en aquéllas que producen “estiramiento” o “acortamiento” de las superficies superior e inferior de la viga [1], se analizan los efectos de los esfuerzos normal y flector sobre una sección de la viga ubicada sobre el pivote. A modo de ejemplo, se trabajará con la superficie superior de la viga.

Las tensiones normales debidas el esfuerzo normal y flector se definen, respectivamente, como:

$$\sigma_N = \frac{N}{A_t}, \text{ y } \sigma_M = \frac{My}{I_{xx}} \tag{12}$$

donde A_t es el área transversal de la viga, y es la distancia entre la fibra neutra y la superficie superior, e I_{xx} es el momento de inercia de la sección. La tensión total para la fibra señalada de la sección escogida es $\sigma_{Tot} = \sigma_N + \sigma_M$, y su correspondiente deformación es $\varepsilon_{Tot} = \sigma_{Tot} / E$. E es el módulo de elasticidad del material.

6. RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis precedente se aplicó sobre un AIBM Convencional, cuyos datos geométricos [8, 9] se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Datos geométricos del AIBM estudiado

I [pulg]	120
K [pulg]	192,87
A [pulg]	208,14
s_{max} [pulg]	168,31
A_t [pulg ²]	59,1
I_{xx} [pulg ⁴]	11500
y [pulg]	16,84

El momento flector y el esfuerzo normal obtenidos con las Ecs. (11) y adimensionalizados se muestran en la Fig. 6 para un equipo convencional ($a=1$) con la geometría de la Tabla 2. En esta figura puede verse que ambos esfuerzos pueden representarse con alta fidelidad con ecuaciones lineales simplificadas, tales como:

$$\begin{aligned}
 N_L &\approx F \sin(\Theta_\varepsilon) \left(1 - \frac{s}{A\Theta_\varepsilon} \right) \\
 M_L &\approx FA + (a-1) \cos(\Theta_\varepsilon)
 \end{aligned} \tag{13}$$

donde Θ_ϵ es una constante definida en la Ec. (8). Es de destacar que el valor del esfuerzo normal alcanza, para este ejemplo, aproximadamente el 40% del valor de la carga del vástago. Esto, como se verá, tiene influencia no despreciable sobre las deformaciones sobre la viga.

Para los resultados de esta sección se adopta un coeficiente de fricción $\mu=0,2$ y el módulo de elasticidad correspondiente al acero. No obstante las aproximaciones de las Ecs. (13) no incluyen al coeficiente de fricción como variable.

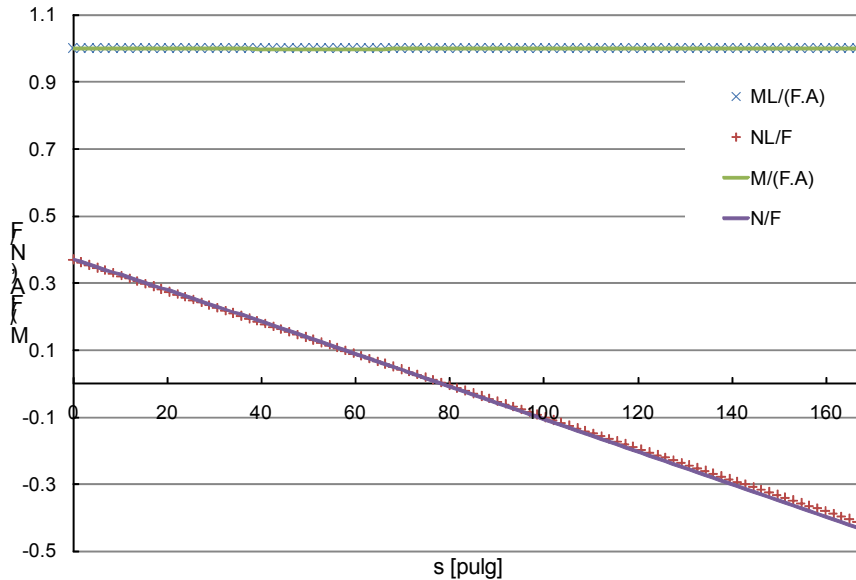


Figura 6: Esfuerzos adimensionales normal y flector para un AIBM Convencional ($a=1$) con las características de la Tabla 2

6.1. Resultados Experimentales

Para evaluar las posibilidades de determinar la fuerza sobre el vástago a partir de mediciones de deformación sobre la viga, así como la posible presencia de factores externos que generen esfuerzos, se muestran en la Fig. 7 la carta dinamométrica adimensional obtenida en el AIBM Convencional de la Tabla 2 con una celda de carga de anillo sobre el vástago, la carta inferida mediante medición de deformación en la viga, sin ninguna compensación (viga S/C), y la correspondiente a la medición en la viga luego de aplicar una corrección lineal de acuerdo a las Ecs. (13) (viga C/C).

Puede apreciarse que la carta medida sobre el vástago muestra una inclinación no presente en la medición sobre la viga. Asimismo se observa que, si bien la compensación lineal acerca ambas mediciones y brinda una semejanza cualitativamente aceptable, existen ciertas discrepancias notorias en algunas regiones de las curvas. Si bien las mismas no han sido analizadas en detalle, podrían atribuirse a las simplificaciones adoptadas en el modelo propuesto (linealización, análisis únicamente estático), o a la existencia de los mencionados “factores externos”, indicando que en este pozo en particular existen anomalías de montaje o fabricación que habría que verificar.

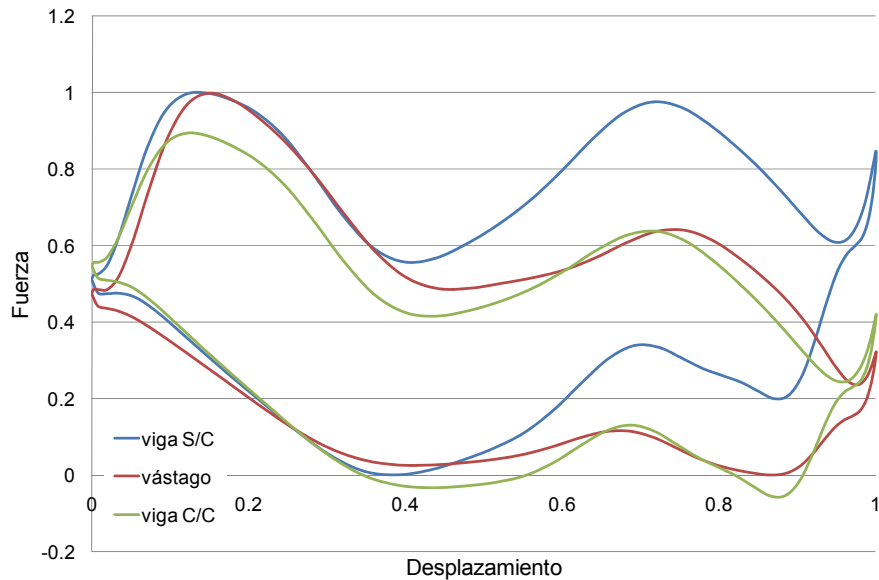


Figura 7: Cartas dinamométricas del AIBM de la Tabla 2

Para la determinación de la curva compensada se recurrió a un algoritmo para minimizar el error estándar entre esta curva y la determinada mediante la medición sobre el vástago. Para ello, se consideraron tres parámetros variables en el cálculo (m , b , y f) y se expresó a la curva compensada como:

$$Fza_{C/C} = (Fza_{S/C} + m \text{ Desp} + b)f \quad (14)$$

donde m y b son la pendiente y la ordenada al origen de la formulación lineal de la Ec. (13), respectivamente, y f es un factor de escala.

7. CONCLUSIONES

El modelo empleado para simular la interacción entre el cable y la cabeza de mula arroja resultados que pueden ser reproducidos fielmente mediante una función lineal proporcional al ángulo de la viga. Esta particularidad posibilita una compensación sencilla de la deformación medida sobre la viga para obviar efecto del esfuerzo normal, a fin deducir la carga ejercida sobre el vástago. No obstante, es necesaria la prueba de las hipótesis consideradas en el desarrollo del modelo mediante formulaciones más abarcativas (modelos dinámicos) y mediciones experimentales.

Determinaciones de deformación en la viga podrían utilizarse, además, para inferir posibles problemas de fabricación y/o montaje del AIBM.

8. REFERENCIAS

- [1] Takáks, G., *Modern Sucker-Rod Pumping*, PennWell Books, 1993.
- [2] Vignolo, G.G. y Vázquez, J.A., Desarrollo de un Medidor de Deformación Paralelo No Intrusivo Para la Determinación de Cargas en Vigas, *I CAIM*, 2008.
- [3] Vignolo, G.G. y Vázquez, J.A., Diseño, Construcción y Calibración de una Celda de Carga para Aparatos Individuales de Bombeo Mecánico de Petróleo, *VIII Congreso American Society of Mechanical Engineers – Universidad Simón Bolívar (ASME USB 2009)*, Caracas, 2009.
- [4] Barilá, D.O. y Battaglia, O.A., *Análisis de Falla en Equipo de Bombeo Lufkin Mark II -912- 365 -168*, Informe de Laboratorio de Ensayos Industriales UNPSJB, 2001.
- [5] Barilá, D.O. y Martínez, E., *Informe Departamento de Mecánica N° 4/2003: Análisis de causas de rotura de equipo AIB Vulcan*, UNPSJB, 2003.
- [6] Vignolo, G.G., Vázquez, J.A., Método de Cálculo de Cartas Dinamométricas de Fondo a Partir de Cartas de Superficie, *Mecánica Computacional*, Vol. XXVIII: 841-852, 2009.
- [7] Faïres, V., *Diseño de Elementos de Máquinas*, Limusa, 1965.
- [8] Vignolo, G.G., *Dinamometría de Superficie*, Informe de UNPSJB a OEDSUR SRL, 2005.
- [9] Lufkin, *Lufkin General Catalog*, 2004.