

Análisis del efecto de flotación y esfuerzo de corte en la sarta de varillas y bomba de fondo en la producción de aceite pesado y extrapesado mediante bombeo mecánico

Carlos Fernando Tapia García
carlos.fernando.tapia@pemex.com

Ricardo Abraham Ochoa Félix
ricardo.abraham.ochoa@pemex.com
Pemex Exploración y Producción

Información del artículo: recibido: febrero de 2017-aceptado: abril de 2017

Resumen

Durante la etapa de instalación (introducción al pozo) y operación de aparejos de levantamiento artificial tipo bombeo mecánico, son pocos los problemas que se presentan cuando el aceite que se pretende producir es de densidades API mayores a 12° y viscosidades relativamente inferiores a 1000 cp a condiciones de 37.8°C de temperatura. Sin embargo, cuando las características del aceite - en particular del tipo extrapesado - tales como que su densidad API sea menor a 12° y viscosidades superiores a 20,000 cp a condiciones de 37.8°C de temperatura, se presentan problemas al momento de querer introducir las varillas de succión dentro del pozo y durante la operación del sistema.

A continuación se presenta el desarrollo de un modelo matemático a partir de un balance de cantidad de movimiento, para determinar el esfuerzo de corte que el líquido (aceite o agua) ejerce sobre la bomba subsuperficial y la sarta de varillas, considerando que el modelo reológico del fluido corresponde a un fluido newtoniano, así como el desarrollo de la ecuación para determinar la magnitud de la fuerza de flotación que el fluido ejerce sobre la bomba y varillas del sistema de levantamiento artificial tipo bombeo mecánico.

Palabras clave: Efecto de flotación, sarta de varillas, bomba de fondo, aceite pesado, aceite extrapesado, bombeo mecánico.

Analysis of the effect of flotation and shear in the string of rods and pump in the background in the production of heavy and extra-heavy oil by pumping mechanical

Abstract

During the stage of installation (introduction to the well) and operation of artificial lift type pumping rigs, few problems that occur when the oil which is intended to produce API densities greater than 12° and viscosities relatively less than 1000 cp to 37.8 ° C temperature conditions. However, when the characteristics of oil - in particular the extra-heavy type - such as its density API is less than 12 ° and viscosity higher than 20,000 cp to 37.8 ° C temperature conditions, problems arise when wanting to insert the rods of suction inside the well and during the operation of the system.

Below is the development of a mathematical model from a Balance of amount of movement, to determine the effort of cutting that liquid (oil or water) exerts on the subsurface pump and the string of rods, whereas the fluid rheological model corresponds to a Newtonian fluid, as well as the development of the equation to determine the magnitude of the buoyant force that the same fluid exerts on the pump and system of artificial lift type pumping rods.

Keywords: Effect of flotation, string of rods, bottom pump, heavy oil, extra-heavy oil, pumping mechanical.

Introducción

Cuando se trata de producir aceite pesado cuya densidad API es inferior a 12°, es común escuchar a los operadores que las varillas flotan o que el pozo no produce, atribuyéndose esta problemática a que el aceite es muy viscoso y/o muy pesado. En parte tienen razón y en parte no. Cabe hacerse el siguiente planteamiento: si el fluido al desplazarse tuviera una densidad API de 10°, pero en un caso el fluido fuera agua y en el otro fuera un aceite ¿se presentaría el mismo problema de que las varillas “flotan”? La fuerza de flotación es función de la densidad del fluido y no de la viscosidad.

Con la intención de entender qué es lo que sucede en el equipo subsuperficial de producción (varillas de succión y bomba de fondo), se revisarán algunos conceptos básicos y se presentará el desarrollo de un modelo matemático a partir de un balance de cantidad de movimiento. Por otra parte, en el caso de la explotación de yacimientos que contienen aceites tipo extrapesado –viscosidades en el fondo del pozo del orden de 1000 a 2000 cp y densidades API de 5 a 10 °-, se documenta cómo la viscosidad del aceite es la variable que más afecta el rendimiento y eficiencia de los componentes superficiales y subsuperficiales del sistema de levantamiento artificial, razón por la cual ésta es una de las variables de escrutinio que más pesa al tener que decidir qué tipo de sistema artificial es el que se va a emplear.

Revisión de conceptos

Fuerza de flotación. Cuando un cuerpo se sumerge total o parcialmente en un fluido, se desplaza una cierta porción de éste. Teniendo en cuenta la presión que el fluido ejerce sobre el cuerpo, se infiere que el efecto neto de las fuerzas de presión es una fuerza resultante apuntando verticalmente hacia arriba, la cual tiende en forma parcial, a neutralizar la fuerza de gravedad, también vertical, pero apuntando hacia abajo. La fuerza ascendente se llama fuerza de empuje o fuerza de flotación y puede demostrarse que su magnitud es exactamente igual al peso del fluido desplazado. Por lo tanto, si el peso de un cuerpo es menor que el del fluido que desplaza al sumergirse, el cuerpo debe flotar en el fluido y hundirse si es más pesado que el mismo volumen del líquido donde está sumergido o de esta otra manera, si la densidad de un objeto completamente sumergido (sin importar su forma) es mayor que la densidad del fluido en el que se encuentra, el objeto se hundirá, **Figura 1**. El principio de Arquímedes es un enunciado de esta conclusión, del todo comprobada, que dice que todo cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido, está sometido a una fuerza igual al peso del fluido desalojado. Su expresión matemática es la siguiente: $F_v = PVg$.

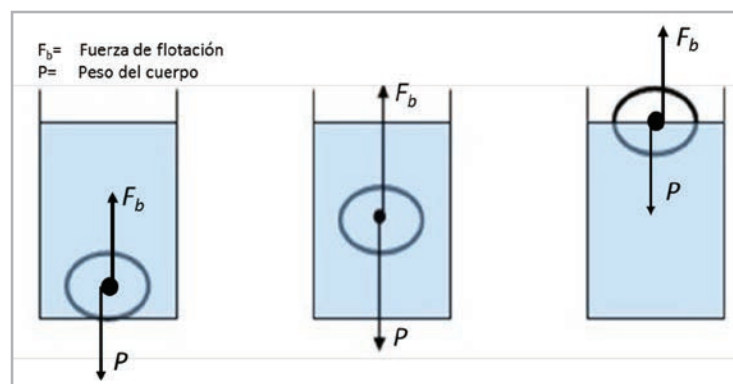


Figura 1. Fuerza de flotación.

Viscosidad. La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes. La viscosidad es una característica de los fluidos en movimiento, que muestra una tendencia de oposición hacia su flujo ante la aplicación de una fuerza. Cuanta más resistencia oponen los líquidos a fluir, más viscosidad poseen. Los líquidos, a diferencia de los sólidos, se caracterizan por fluir, lo que significa que al someterse a una fuerza, sus moléculas se desplazan, tanto más rápidamente como sea el tamaño de sus moléculas. Si son más grandes, lo harán más lentamente. A este tipo de viscosidad se le conoce como **viscosidad absoluta o viscosidad dinámica** y generalmente se representa por

la letra griega μ . La **viscosidad cinemática** se calcula dividiendo a la viscosidad dinámica por la densidad del fluido y se representa con la letra griega ν .

Esfuerzo de corte. Se puede definir como la fuerza normal aplicada a una superficie. También, a partir de la ley de Newton de la viscosidad, el esfuerzo de corte se define como el producto de la viscosidad por la rapidez de deformación; la ecuación que representa esta definición es la siguiente:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dx}$$

Reología de fluidos. La reología es la ciencia que estudia el flujo y las deformaciones de los fluidos bajo la influencia de fuerzas mecánicas, así mismo, es una rama de la física que estudia, en general, la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el flujo de la materia. En la **Figura 2** se muestra la clasificación de los fluidos al someterse a diferentes esfuerzos de corte.

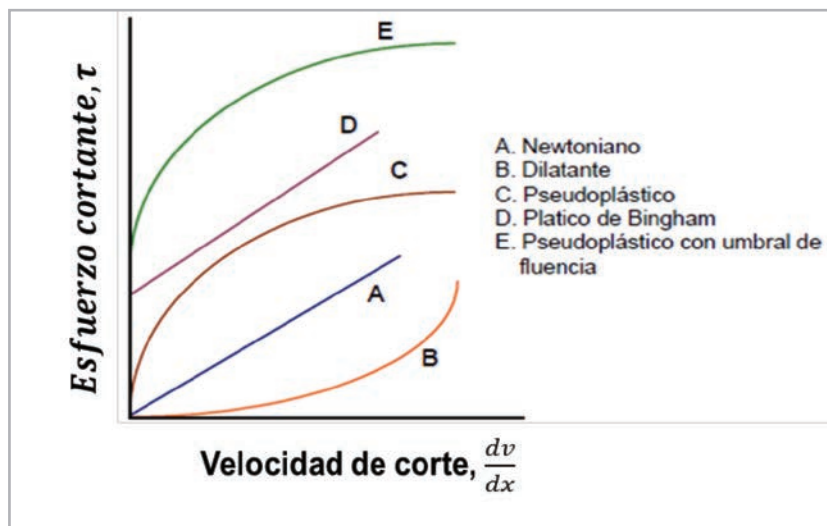


Figura 2. Comportamiento del esfuerzo de corte independientemente de su duración.

Carta dinamométrica. Es un diagrama de carga contra desplazamiento resultante del registro de todas las fuerzas que actúan sobre la varilla pulida con respecto a su posición, en cualquier instante durante el ciclo de bombeo. El diagrama registrado está dado con la posición de la varilla en la abscisa y la carga en la ordenada, **Figura 3**.

La carta dinamométrica permite¹ responder a preguntas relacionadas con probables incrementos de producción y muchas otras magnitudes, que permiten determinar de manera global si el sistema está trabajando de forma eficiente y, por lo tanto, tomar las medidas necesarias para corregir lo necesario.

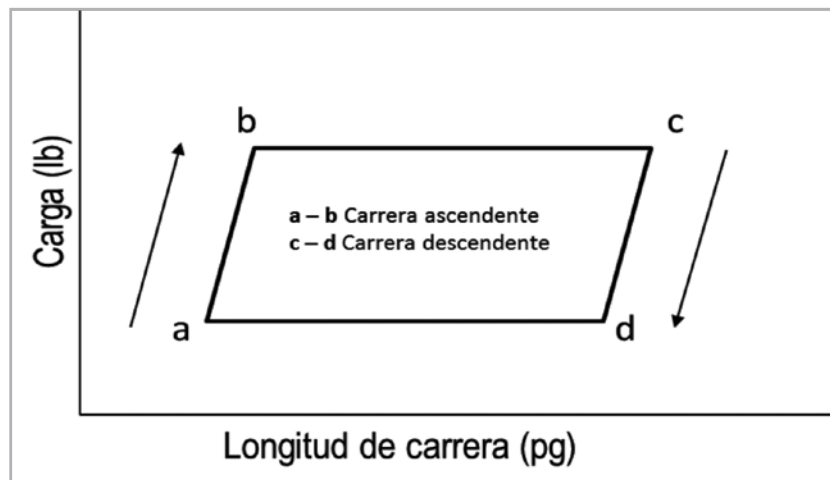


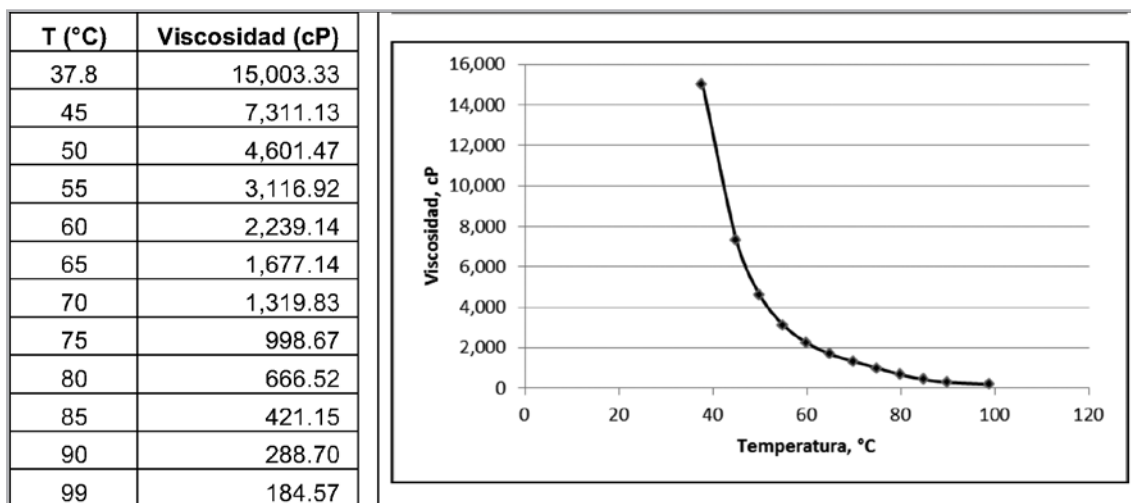
Figura 3. Carta dinamométrica teórica.

Efecto de la fuerza de flotación F_b sobre las varillas de succión

Con la finalidad de ilustrar el efecto que ejerce un aceite extrapesado sobre una sarta de varillas de succión, a continuación, se presenta el ejemplo siguiente.

Considérese un aceite cuya densidad es de 10.2 °API (0.998 g/cm³). Su viscosidad a diferentes temperaturas se muestra en la **Tabla 1**. Se desea calcular la fuerza de flotación F_b y la fuerza resultante por pie de longitud de una varilla de succión de 1 pg de diámetro nominal, (área transversal igual a 0.785 pg² y 2.9 lb/pie de peso en el aire), que se encuentra inmersa en el aceite antes mencionado.

Tabla 1. Viscosidad de un aceite de 10.2 °API a diferentes temperaturas.



$$F_b = \rho_o V_{sumergido} g = 998 \left(\frac{kg}{m^3} \right) x [0.3048(m) x 0.00051(m^2)] x 9.8 \left(\frac{m}{s^2} \right) = 1.5803 \left(kg \frac{m}{s^2} \right)$$

El empuje o fuerza de flotación F_b es una fuerza dirigida hacia arriba y el peso P de la varilla es hacia abajo. La fuerza resultante es la resta de las anteriores, $(P - F_b)$.

$$P = \rho_{\text{acero}} V_{\text{sumergido}} g = 7,900 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \times [0.3048(\text{m}) \times 0.00051(\text{m}^2)] \times 9.8 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 12.03 \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

$$P - F_b = [12.03 - 1.5803] \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 10.455 \left(\text{kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)$$

Es decir, el efecto de la densidad del aceite extrapesado, sólo afecta un 13 % al peso de las varillas, por lo tanto, éstas no flotarán y tenderán a hundirse.

Desarrollo de la ecuación de balance de cantidad de movimiento

El estudio² del proceso de transferencia de cantidad de movimiento implica establecer relaciones matemáticas entre la cantidad de movimiento transferida por unidad de tiempo, a través de un área unitaria normal a la dirección de transporte (densidad de flujo de cantidad de movimiento), y la fuerza impulsora responsable de dicha transferencia, que, en el caso de transporte de cantidad de movimiento, está representada por el gradiente de velocidades. Esta

relación matemática deberá establecerse en términos de las propiedades físicas del medio en que ocurre el transporte, de las dimensiones tanto espaciales como de tiempo, así como de las propiedades del campo de velocidades que rigen el proceso.

En procesos de transferencia que se realizan en un medio continuo, es posible establecer un principio fundamental de conservación, el cual es válido, independientemente de si la propiedad transferida es cantidad de movimiento, calor o masa. Considerando válido el principio que establece que *la masa no se crea ni se destruye* (mecánica Newtoniana) y suponiendo que no existe generación de la propiedad transferida dentro del volumen elemental, el principio fundamental de conservación en términos de cantidad transferida por unidad de tiempo es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de entrada} \\ \text{de cantidad de movimiento} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de salida} \\ \text{de cantidad de movimiento} \end{array} \right\} + \sum \text{Fuerzas que actúan en el sistema} = 0$$

A continuación, se presenta el desarrollo de un modelo a partir de este principio de balance de cantidad de movimiento, para determinar el esfuerzo cortante que el fluido (aceite) ejerce sobre las varillas de succión, considerando que el modelo reológico que representa al aceite corresponde a un fluido Newtoniano.

La **Figura 4** representa a una sarta uniforme de varillas de succión de diámetro d , que se mueve a una velocidad v hacia arriba y hacia abajo dentro de una tubería de producción de diámetro D . Así mismo, se supone que las varillas se encuentran concéntricas en la tubería de producción y están inmersas en aceite cuya densidad es ρ y densidad μ .

Otras consideraciones son las siguientes:

- Régimen permanente
- Propiedades del fluido permanecen constantes
- Efectos de bordes se consideran despreciables

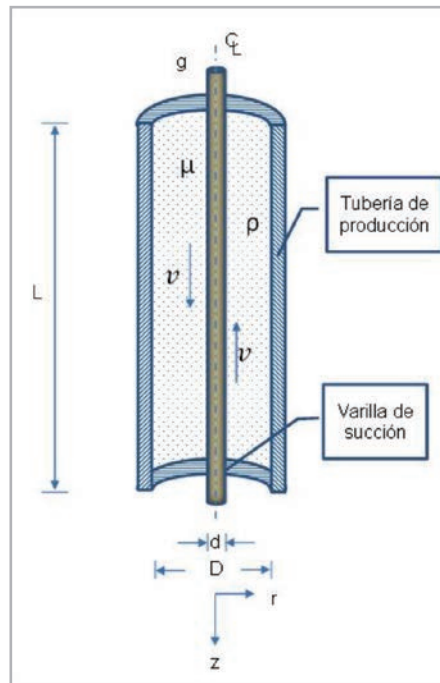


Figura 4. Sarta de varillas de succión dentro de una tubería de producción.

El balance de cantidad de movimiento se realizará en el volumen de control = $2\pi r\Delta rL$

$$(2\pi L)(r\tau_{rz}) \Big|_r - 2\pi L(r\tau_{rz}) \Big|_{r+\Delta r} + \underbrace{2\pi r\Delta r v_z \rho v_z \Big|_{z=0} - 2\pi r\Delta r v_z (\rho v_z) \Big|_{z=L}}_{=0 \text{ (régimen permanente)}} + 2\pi r\Delta r L \rho g = 0$$

Dividiendo entre $2\pi L\Delta r$

$$\frac{(2\pi L)(r\tau_{rz}) \Big|_r}{2\pi L\Delta r} - \frac{2\pi L(r\tau_{rz}) \Big|_{r+\Delta r}}{2\pi L\Delta r} + \frac{2\pi r\Delta r L \rho g}{\Delta r 2\pi L} = 0$$

Multiplicando por (-1) y obteniendo el límite cuando $\Delta r \rightarrow 0$

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \left(\frac{r\tau_{rz} \Big|_{r+\Delta r} - r\tau_{rz} \Big|_r}{\Delta r} \right) = \rho g r$$

Aplicando la definición de *derivada*

$$\frac{d}{dr} (r\tau_{rz}) = \rho g r$$

Separando variables e integrando

$$\int d(r\tau_{rz}) = \rho g \int r dr$$

$$r\tau_{rz} = \rho g \frac{r^2}{2} + c_1$$

Despejando

$$\tau_{rz} = \frac{\rho g r^2}{2r} + \frac{c_1}{r}$$

$$\tau_{rz} = \frac{\rho g r}{2} + \frac{c_1}{r}$$

De la Ley de Newton de la viscosidad para un fluido newtoniano

$$\tau_{rz} = -\mu \frac{dv_z}{dr}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior

$$-\mu \frac{dv_z}{dr} = \frac{\rho g r}{2} + \frac{c_1}{r}$$

Separando variables e integrando

$$\frac{dv_z}{dr} = -\frac{\rho g r}{2\mu} - \frac{c_1}{\mu r}$$

$$\int dv_z = -\frac{\rho g}{2\mu} \int r dr - \frac{c_1}{\mu} \int \frac{1}{r} dr$$

$$v_z = -\frac{\rho g}{4\mu} r^2 - \frac{c_1}{\mu} \underbrace{\int \frac{1}{r} dr}_A + c_2$$

Resolviendo la ecuación A

$$u = \frac{r}{D} \rightarrow r = uD \rightarrow dr = Ddu$$

$$\int \frac{1}{r} dr = \int \frac{1}{Du} Ddu = \int \frac{1}{u} du = \ln u = \ln\left(\frac{r}{D}\right)$$

Sustituyendo el resultado en v_z

$$v_z = -\frac{\rho g}{4\mu} r^2 - \frac{c_1}{\mu} \ln\left(\frac{r}{D}\right) + c_2$$

Resolviendo la ecuación para las condiciones siguientes de frontera:

$$r = \frac{D}{2}, v_z = 0 \quad (\text{en la pared interior de la tubería de producción})$$

$$r = \frac{d}{2}, v_z = v \quad (\text{en la pared exterior de la varilla de succión; es decir, el fluido tiene la misma velocidad a la que se mueve la varilla de succión})$$

Se obtiene:

$$\tau_{rz} = \underbrace{\frac{\rho g d}{4}}_B - \frac{2}{d} \underbrace{\left[\frac{\mu v + \frac{\rho g}{16}(d^2 - D^2)}{\ln(d/D)} \right]}_C$$

Analizando esta última ecuación se tiene:

- Dado que $D > d$, en $\ln(d/D)$, el siempre será negativo, por lo que el valor de $-\frac{2}{d} \left[\frac{\mu v + \frac{\rho g}{16}(d^2 - D^2)}{\ln(d/D)} \right]$ será positivo y se suma al término $\frac{\rho g d}{4}$
- Entre mayor sea el valor de la viscosidad μ , mayor será el valor del término **C** y consecuentemente, mayor el valor de τ_{rz}
- Entre mayor sea la velocidad de introducción de las varillas (v) y mayor la viscosidad del aceite (μ), mayor será el valor del esfuerzo de corte (τ_{rz})

Conclusiones

Aplicando conceptos sencillos como lo es el principio de Arquímedes, queda demostrado que las varillas de succión no flotan.

El esfuerzo de corte τ_{rz} es el factor principal que influye en que las varillas de succión no puedan bajar al interior de un pozo que contiene aceite muy viscoso.

Este último aspecto debe considerarse cuando se selecciona el sistema artificial de producción, en particular para el caso del bombeo mecánico en aceites muy viscosos, ya que la apertura-cierre, tanto en la válvula de pie como en la válvula viajera de la bomba de fondo, se verá afectado con la ineficiencia consecuente en la producción.

Para explotar este tipo de aceites lo más conveniente es emplear un sistema artificial tipo cavidades progresivas y/o inyectar un diluyente en el fondo del pozo, que permita adelgazar al fluido producido por la formación.

Agradecimientos

El autor desea reconocer las facilidades otorgadas por Pemex Exploración y Producción por la información proporcionada para la elaboración de este artículo técnico.

Referencias

1. Ramírez Espino, G. 2014. *Bombeo Mecánico Moderno*. México, D.F.: Instituto Politécnico Nacional.

2. Rivera, J. 2006. *Apuntes de Fenómenos de Transporte*. México, D.F.: UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado.

Nomenclatura

- F_b = Fuerza de flotación
 r = Densidad del fluido
 g = Fuerza de gravedad
 V = Volumen del fluido desplazado
 μ = Viscosidad dinámica o absoluta
 t = Esfuerzo de corte
 v = Velocidad
 y = Distancia
 ν = Viscosidad cinemática

Semblanza de los autores

Carlos Fernando Tapia García

Ingeniero Petrolero egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cuenta con dos posgrados realizados en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México: Especialidad en Métodos Artificiales de Producción petrolera y Maestría en Ingeniería Petrolera y Gas Natural en el área de yacimientos, en ambos se ha graduado con Mención Honorífica.

Cuenta con más de 23 años de experiencia en la industria petrolera, ha dirigido diversos proyectos de explotación. Es miembro del Colegio de Ingenieros Petroleros de México y de la Society Petroleum Engineering.

Ricardo Abraham Ochoa Félix

Ingeniero Petrolero egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Cuenta con dos años de experiencia en ingeniería de producción, especializado en la explotación de aceites extrapesados. Colabora en el Proyecto de Explotación Samaria Somero en el Activo de Producción Samaria Luna.

Es miembro del Colegio de Ingenieros Petroleros de México.