

“XII Congreso Latinoamericano de Perforación”

“Estudio de Flujo Turbulento en el Fondo del Pozo y su Impacto
Sobre la Capacidad de Acarreo del Fluido de Perforación”

MC. José Héctor Rodríguez Hernández

Ing. David Velázquez Cruz

Ing. Edgar Fco. de la Rosa Acevedo

Ing. Oswaldo Hernández Mena

Instituto Mexicano del Petróleo
México

1.Introducción.

Problemas derivados de una mala limpieza del pozo como lo son un alto torque, pegaduras, pescados y en general un mal desempeño de las operaciones de perforación, han originado que hoy en día existan varios trabajos de investigación teórica y experimental sobre el tema en diferentes centros relacionados con la ingeniería petrolera.

Un hecho físico que se sabe es una constante durante las operaciones de perforación son las condiciones de régimen de flujo turbulento del fluido de perforación en la tubería de perforación y en el fondo del pozo hasta una determinada altura en el espacio anular en la que el régimen cambia (zona de transición) y a partir de ahí hasta la salida del pozo puede considerarse bajo un régimen de flujo laminar. También se conoce que una de las principales funciones del fluido de perforación es la remoción y transporte de los recortes, por lo tanto, es natural pensar que estudios sobre la limpieza del pozo sean dirigidos a la búsqueda de modelos físicos y matemáticos que nos permitan establecer relaciones entre turbulencia, propiedades del fluido de perforación y cantidad, distribución de tamaño y propiedades de los recortes generados. Un estudio de esta índole es el que será desarrollado en las siguientes líneas.

La mayoría de los modelos utilizados normalmente en ingeniería petrolera utilizan el criterio del número de Reynolds para establecer el tipo de régimen y posteriormente definir las correlaciones y modelos a utilizar para la determinación de las variables de flujo. En las siguientes líneas se desarrolla un modelo teórico para la descripción de la turbulencia conocido como $k-\epsilon$ resuelto conjuntamente con las ecuaciones de Navier - Stokes. La fundamentación de este modelo como se vera más adelante es tratar a la turbulencia como un fenómeno de disipación de energía, es decir, en nuestro caso habría una generación y una disipación de energía cinética del fluido debido a la turbulencia. El campo de flujo generado por ciertas condiciones iniciales y en las fronteras aplicadas a las ecuaciones anteriores se hace interaccionar con un conjunto de partículas sólidas utilizando una distribución de tamaño de Rozzin-Ramler con un diámetro medio de 5mm. Bajo estas condiciones la propiedad del fluido que mas afecta

al flujo es sus viscosidad efectiva, la cual es la suma de las viscosidad turbulenta y la viscosidad aparente ó viscosidad molecular del fluido.

Para la solución de las ecuaciones es necesaria la especificación de la geometría en la cual se desarrolla el flujo por lo que durante las simulaciones son tomadas en cuenta implícitamente efectos de la inclinación y profundidad del pozo.

El sistema se resuelve por técnicas de volumen finito, elemento finito y/o diferencias finitas. En estos métodos se considera que las propiedades viscosidad efectiva, campos de velocidad del fluido y campo de presiones cambian su valor en cada nodo (puntos de unión de las celdas) en los cuales se dividió al dominio. Conocido el valor de las variables en todo el dominio de solución a un tiempo cero (inicialmente) se procede a aproximar el valor de las variables a un tiempo “t” (aproximación temporal) desde las celdas localizadas en las fronteras del dominio y cuyos valores se deben de conocer a cualquier tiempo. Para la aproximación espacial, se debe hacer un barrido desde las fronteras hasta lograr una aproximación en todo el dominio de solución fijando la variable independiente tiempo.

2. Modelo.

Las ecuaciones de Navier – Stokes son las formas diferenciales de la segunda ley de Newton del movimiento (momentum) y conservación de la masa (continuidad). Analizando primeramente la fase continua (fluido) y partiendo de las ecuaciones generales de conservación de masa y momentum:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{f} \quad (2)$$

en donde:

ρ = densidad.

$\vec{u}$ = vector velocidad.

τ = tensor de esfuerzos.

$\vec{f}$ = fuerza externa (gravedad).

El sistema de ecuaciones producido al desarrollar las ecuaciones para dos dimensiones anteriores se puede expresar de la siguiente forma :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = s \quad (3)$$

Que expresa en forma vectorial la ecuación de Navier-Stokes considerando a un vector como un conjunto ordenado de cantidades.

Por otro lado, el estudio del movimiento de esferas sólidas suspendidas en un fluido viscoso comienza con Boussinesq. Las fuerzas de resistencia consisten del efecto de masa, el arrastre de Stokes, y al campo de flujo inestable. Estas fuerzas están dadas por los correspondientes términos del lado derecho de la siguiente ecuación:

$$m_p \frac{dU_p}{dt} = \frac{1}{2} v_p \bar{r} \left(\frac{d}{dt} \right) (U - U_p) + 6 p m a (U - U_p) + m_p f + 6 (p \bar{r} \bar{m})^{1/2} a^2 \int_{-\infty}^t \left(\frac{d}{dt} \right) (U - U_p) (t - t')^{-1/2} dt \quad (4)$$

Estas fuerzas son causadas por la esfera de masa m_p para acelerar o desacelerar a lo largo de la trayectoria dada por dU_p/dt con movimiento progresivo. Esta ecuación representa el campo de fuerzas sobre una partícula inmersa en un fluido en movimiento. El término del lado izquierdo de la ecuación es la fuerza resultante sobre la partícula, el primer término del lado derecho sería la fuerza del fluido sobre la partícula, el siguiente es la fuerza de fricción sobre la partícula (siempre actúa en sentido contrario al movimiento de la partícula), el tercer término es el campo de fuerzas externas actuando sobre la partícula (gravitatorias ó magnéticas) y el último término el efecto que tienen sobre la partícula las inestabilidades del flujo transitorio (en régimen permanente se puede despreciar). En la ecuación (4), v_p es el volumen de la esfera de radio a , f es el campo de fuerzas por unidad de masa, $\bar{r}$ es la densidad del fluido, $\bar{m}$ es la viscosidad, U es la velocidad; U_p es la velocidad de la esfera, y t es el tiempo.

2.1 Modelos de turbulencia.

Los modelos turbulentos de viscosidad tienen significativas deficiencias, algunas son consecuencia de asumir a la viscosidad como turbulenta. En dos dimensiones, siempre se selecciona el de viscosidad turbulenta que haga a la ecuación correcta, al menos para el esfuerzo de corte.

2.1.1 Modelos simples de turbulencia.

Se ha visto que un modelo razonablemente poderoso para la sección de predicción considerando flujo laminar, energía de disipación y transporte de masa, momentum, y energía normal esta influenciado por la viscosidad, esto es natural ya que se asume que el efecto de turbulencia puede ser representado como un incremento en la viscosidad. Esto conduce al modelo de viscosidad turbulenta:

$$-r \overline{u_i u_j} = m_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} r d_{ij} k \quad (5)$$

$$-r \overline{u_j f} = \Gamma_t \frac{\partial \bar{f}}{\partial x_j} \quad (6)$$

En la ecuación (5), k es la energía cinética turbulenta:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} = \frac{1}{2} \left(\overline{u_x u_x} + \overline{u_y u_y} + \overline{u_z u_z} \right) \quad (7)$$

El último término en la ecuación (5) es requerido para garantizar que, cuando ambos lados de la ecuación son factorizados, el resultado de la ecuación sea el correcto. Aunque la hipótesis de viscosidad turbulenta no es correcta a detalle, es fácil llevar a cabo y, con una aplicación adecuada, puede arrojar buenos resultados para varios tipos de flujo.

En la descripción más simple, la turbulencia puede ser caracterizada para dos parámetros: energía cinética, k , o una velocidad, $q = \sqrt{k}$, y la escala, L .

Un análisis dimensional muestra que:

$$m_t = C_m r q L \quad (8)$$

Donde C_m es una constante adimensional.

En el modelo practico simple, modelos de longitud de mezclado, k es determinada a partir de una campo de velocidades promedio usando $q = L \partial u / \partial y$ y L es prescrita en función de las coordenadas. La dificultad en prescribir las cantidades turbulentas sugiere usan ecuaciones diferenciales para él calculo. Posteriormente una mínima descripción de turbulencia requiere por lo menos de una escala de velocidades y una escala de longitud, un modelo que derive las cantidades necesarias. En casi todos los modelos, una ecuación para la energía cinética turbulenta, k , obtiene la velocidad de escala. La ecuación exacta para esta cantidad no es difícil de derivar:

$$\frac{\partial(rk)}{\partial t} + \frac{\partial(r \bar{u}_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(m \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{r}{2} \overline{u_j u_i u_i} + \overline{p' u_j'} \right) - r \overline{u_j u_i} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - m \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \quad (9)$$

Los términos del lado izquierdo de esta ecuación y el primer término del lado derecho no necesitan ser modelados. El último término representa el producto de la densidad r y la disipación, ϵ . El segundo término en el lado derecho representa la difusión turbulenta de la energía cinética, casi siempre modelado usando un gradiente de difusión:

$$- \left(\frac{r}{2} \overline{u_j u_i u_i} - \overline{p' u_j'} \right) \approx \frac{m_t}{s_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (10)$$

donde m_t es la viscosidad turbulenta y s_k es el número turbulento de Prandtl el cual es aproximadamente la unidad.

El tercer término del lado derecho de la ecuación **(9)** representa el ritmo de producción de energía cinética turbulenta debida al flujo, y la transferencia de energía cinética debido al flujo turbulento. Si se usa la hipótesis de viscosidad turbulenta para estimar el esfuerzo de Reynolds, esta puede ser representarse como:

$$P_k = -\overline{ru_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \approx m_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Como se menciona, otra ecuación es requerida para determinar la escala de longitud de turbulencia. Una de las más usadas esta basada en observaciones de que la disipación es necesaria en la ecuación de energía y en la cual el ritmo de producción y destrucción de turbulencia son cercanas al balance, la disipación, e , k , y L son relacionadas por:

$$e \approx \frac{k^{3/2}}{L} \quad (12)$$

Aunque una ecuación exacta para la disipación puede ser derivada de las ecuaciones de Navier – Stokes, el modelo es riguroso ya que considera la ecuación completa como un modelo. Su forma más usual es:

$$\frac{\partial(re)}{\partial t} + \frac{\partial(ru_j e)}{\partial x_j} = C_{e1} P_k \frac{e}{k} - r C_{e2} \frac{e^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{m_t}{s_e} \frac{\partial e}{\partial x_j} \right) \quad (13)$$

En este modelo, la viscosidad turbulenta es expresada como:

$$m_t = r C_m \sqrt{k} L = r C_m \frac{k^2}{e} \quad (14)$$

El modelo basado en las ecuaciones **(9)** y **(13)** es llamado modelo $k-e$. Este modelo contiene cinco parámetros; los valores más comúnmente usados son:

$$C_m = 0.09, \quad C_{e1} = 1.44; \quad C_{e2} = 1.92; \quad s_k = 1.0; \quad s_e = 1.3$$

2.1.2 Modelo de esfuerzos de Reynolds

Los modelos más complejos usados en la actualidad son los modelos de esfuerzos de Reynolds, los cuales son basados en ecuaciones dinámicas para el tensor de esfuerzos de Reynolds. Estas ecuaciones son derivadas de las ecuaciones de Navier - Stokes y son:

$$\frac{\partial(\overline{r u_i' u_j'})}{\partial t} + \frac{\partial(\overline{r u_k u_i' u_j'})}{\partial x_k} = -\overline{r u_i' u_k'} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \overline{r u_j' u_k'} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} - e_{ij} - \Pi_{ij} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(m \frac{\partial \overline{u_i' u_k'}}{\partial x_k} - r C_{ijk} \right) \quad (15)$$

Los primeros dos términos del lado derecho de la ecuación (15) son los términos de producción y no requieren de aproximación o modelado.

Los otros términos son:

$$\Pi_{ij} = \overline{p \left(\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_i} \right)} \quad (16)$$

el cual algunas veces es llamado término de esfuerzos de presión y redistribución turbulenta de energía cinética entre los componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds pero no debido al cambio de la energía cinética total.

$$e_{ij} = 2m \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k}} \quad (17)$$

el cual es el tensor de disipación, llamado algunas veces difusión turbulenta.

$$r C_{ijk} = \overline{r u_i' u_j' u_k'} + \overline{p' u_i'} d_{jk} + \overline{p' u_j'} d_{ik} \quad (18)$$

El término de disipación, esfuerzo de presión, y la difusión turbulenta no pueden calcularse exactamente en función de los demás términos en las ecuaciones y además

debe ser modelados. El término de disipación es usualmente modelado como isotrópico:

$$e_{ij} = e d_{ij} \quad (19)$$

Estas ecuaciones para la disipación deben ser resueltas con las ecuaciones de esfuerzos de Reynolds. Especialmente, esto hace que las ecuaciones de disipación sean usadas en el modelo $k - e$.

3. Resultados.

En las **figuras 1,2 y 3** se muestra la variación de la velocidad de levantamiento de recortes inmediatamente después del impacto del fluido para los casos presentados en las **tablas 1 y 2**.

En estas figuras se puede observar el efecto de la viscosidad aparente del fluido de perforación sobre el levantamiento de los recortes. Los fluidos que poseen bajos valores de viscosidad presentan una mayor turbulencia. Los vórtices provocados por esta turbulencia generan zonas muertas (de baja energía) en donde se observa difícil remoción de recortes y acumulación de los mismos, aunque la velocidad adquirida por los recortes inmersos en la corriente fluida sea mayor debida a la mayor velocidad del fluido que en los casos en donde la viscosidad era mas alta (casos 2 y 3).

Si la viscosidad aumenta se observa una menor turbulencia y por lo tanto líneas de corriente con forma suavizada que barren de manera uniforme la superficie del fondo del pozo produciendo mejor levantamiento de las partículas sólidas con respecto al caso anterior. Debe quedar claro igualmente que no se puede aumentar arbitrariamente la viscosidad del fluido suponiendo que la relación aumento de viscosidad-mejor levantamiento es lineal pues otros factores como el gasto, profundidad del pozo, densidad y tamaño de los recortes deben de ser tomados en cuenta en forma simultánea. La relación directa existente entre la viscosidad y la velocidad del fluido

predice que mientras aumente la viscosidad disminuirá la velocidad y como consecuencia disminuirá en forma análoga la velocidad de transporte de los recortes. Esto se puede convertir en un problema si es que el flux de recortes generados es grande.

Basándose en lo antes expuesto se puede afirmar que existe una viscosidad óptima del fluido de perforación para la cual el levantamiento de recortes se optimiza para ciertas condiciones operativas y geometría de pozo especificadas.

En las **figuras 4**, se puede observar el efecto que la inclinación máxima del pozo produce en el levantamiento de recortes.

En estos casos se observa igualmente que fluidos con una viscosidad aparente en el rango de 100-129 cps presentan mejores propiedades para la limpieza de sólidos del fondo que fluidos con viscosidades fuera de este rango.

En general se ha observado que mientras se aumente el gasto aumenta similarmente el transporte de recortes, sin embargo, el valor del gasto no debe de sobrepasar un cierto valor crítico para el cual la excesiva turbulencia con la consecuente creación de grandes zonas muertas y la acumulación de recortes en ellas.

Una constante en todos los casos es que las partículas pequeñas (menores a 5mm) viajan a través del espacio anular cercanas a las paredes externas del pozo ya sea tubería de revestimiento ó formación, mientras que partículas con un diámetro mayor a un centímetro viajan golpeando las paredes del pozo ó la tubería sin una trayectoria especial.

Con la intención de obtener un modelo factible de usarse en campo y apoyándose en los hechos expuestos en las líneas anteriores se propuso la expresión formulada a continuación para el flujo masico de los recortes en función de las principales variables operativas del proceso.

A partir del análisis de la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes y de movimiento para partículas esféricas inmersas en el fluido para las condiciones presentadas en la sección anterior, se obtuvo una expresión para la capacidad de acarreo en función de variables de operación y geometría del pozo

La expresión propuesta para la capacidad de acarreo es la siguiente:

$$C_a = \left[\frac{k_1}{qh} \left(\frac{m_a Q}{d_p} \right)^{n_1} + k_2 \left(\frac{qd_p}{Qm_a} \right)^{n_2} \right] A_p r_p \quad (20)$$

en donde:

C_a =	capacidad de acarreo (MT^{-1})
A_p =	área promedio del espacio anular (L^2)
r_p =	densidad de la partícula. (ML^{-3})
h =	profundidad hasta la cima del empacador (L)
Q =	gasto volumétrico proporcionado por la bomba (L^3T^{-1})
m_a =	viscosidad aparente del fluido ($ML^{-1}T^{-1}$)
q =	ángulo máximo de inclinación (-)
d_p =	diámetro de partícula (L)
k_1 =	constante $\left[\frac{T^{(2n_1-1)}}{(ML)^{n_1}} \right]$
k_2 =	constante $\left[\frac{L^{(n_2+1)}M^{n_2}}{T^{(2n_2+1)}} \right]$
n_1 =	constante (-)
n_2 =	constante (-)

El valor de las constantes k_1 , k_2 , n_1 , y n_2 se calculo a partir de datos de campo obtenidos durante la molienda de empacadores en el activo Cantarell. Para obtener su valor se utilizo el método de Quasi-Newton para minimizar la función error, lo cual se puede expresar como:

$$\text{Minf}(e) = \min(C_a \text{ exp.} - C_a)^2 \quad (21)$$

El valor calculado de las constantes siguiendo la metodología anterior es el siguiente:

$$k_1 = 3439.0632 \left[\frac{s^{(2n_1-1)}}{(Kgm)^{n_1}} \right]$$

$$k_2 = -0.361188 \left[\frac{m^{(n_2+1)} kg^{n_2}}{s^{(2n_2+1)}} \right]$$

$$n_1 = 2.00375$$

$$n_2 = -3.02875$$

Utilizando unidades de campo la ecuación (4.21) tomaría la siguiente forma:

$$Ca = \frac{8.10476272 \times 10^{-5}}{qh} \left(\frac{m_a Q}{d_p} \right)^{n_1} - 5.681500745 \times 10^{-19} \left(\frac{q d_p}{Q m_a} \right)^{n_2} \quad (22)$$

en donde:

$C_a =$	capacidad de acarreo (Kg/min)
$h =$	profundidad hasta la cima del empacador (m)
$Q =$	gasto volumétrico proporcionado por la bomba (gal/min)
$m_a =$	viscosidad aparente del fluido (cps)
$q =$	ángulo máximo de inclinación (-)
$d_p =$	diámetro de partícula (cm)

4. Análisis.

Las ecuaciones **(20)** ó **(22)** pueden ser utilizadas como un criterio de la eficiencia de la operación de levantamiento de recortes durante la molienda de empacadores y el procedimiento es el siguiente:

Para condiciones de operación establecidas sustituir los valores del gasto de fluido proporcionado por la bomba, la viscosidad aparente del fluido, tamaño promedio de la partícula, ángulo máximo de desvío y profundidad hasta la cima del empacador en las ecuaciones **(20)** (si se utiliza el sistema internacional) ó **(22)** (si se utilizan unidades de campo) para obtener la capacidad de acarreo teórica de las partículas.

Comparar el flux de masa teórico con el obtenido realmente; si es mayor el teórico la eficiencia en el acarreo de recortes no es buena y se tendrán que modificar algunas variables de operación para mejorarla. Entre mayor sea la diferencia entre el real y el teórico peores serán las condiciones de acarreo. En el caso contrario si para cierto tamaño de partícula el flux de masa real es igual o mayor que el teórico las condiciones de operación son correctas.

En la **figura 5** se pueden observar la comparación de los datos experimentales (Proyecto de evaluación de tecnologías y equipos para el tratamiento de recortes)⁽⁰⁾ con el modelo el cual predice que la mayor parte de los datos deben de tener un ángulo máximo de desvío de 30 grados lo cual concuerda con la realidad. También se puede observar que dependiendo del ángulo máximo de desvío, para una determinada viscosidad existe un gasto óptimo para realizar el acarreo aunque en general la tendencia es que a un mayor gasto volumétrico la capacidad de acarreo será mayor.

En la **figura 6** se observa que la tendencia predicha por el modelo es que la velocidad de transporte aumente si disminuye el ángulo de inclinación y la altura. Esto se explica debido a que mientras mayor sea la altura existirá una mayor carga hidrostática en el fondo del pozo y el fluido en general tendrá una mayor fuerza de impacto en el fondo y mejores condiciones para el levantamiento de los recortes en esa parte del pozo. Igualmente el ángulo de inclinación se puede explicar debido a que en pozos verticales el efecto gravitacional es mayor que en los inclinados. Cabe mencionar que estos

fenómenos no ocurren en forma separada y que para su correcta evaluación deben de tomarse en cuenta simultáneamente las propiedades reológicas del fluido el tamaño y densidad de las partículas a ser levantadas y la presión proporcionada por la bomba condiciones de operación.

5. Conclusiones.

- a) La capacidad de acarreo es inversamente proporcional a la inclinación máxima del pozo.
- b) La viscosidad óptima del fluido para el acarreo de recortes depende de la inclinación máxima del pozo y el tamaño del recorte.
- c) Para partículas grandes se necesita un fluido con alta viscosidad aparente con el fin de asegurar su correcto levantamiento.
- d) Fluidos con baja viscosidad aparente (menores a 70 cps) producen alta turbulencia en el fondo del pozo provocando zonas muertas en las cercanías de las paredes de la TR ocasionando por ende una acumulación de recortes en esas zonas.

Tabla 1.

Angulo de inclinación (grados)	Ubicación del empacador, profundidad (M)	Viscosidad molecular (aparente) cp
45	1000, 1500	70, 129, 150
90	1000, 1500	70, 129, 150
0	1000, 1500	70, 129, 150

Tabla 2.

Presión de Bombeo (Kg/cm ²)	70
Densidad del fluido (g/cm ³)	0.980
Viscosidad aparente (cp)	70, 129 y150
Densidad de la partícula (g/cm ³)	7.600

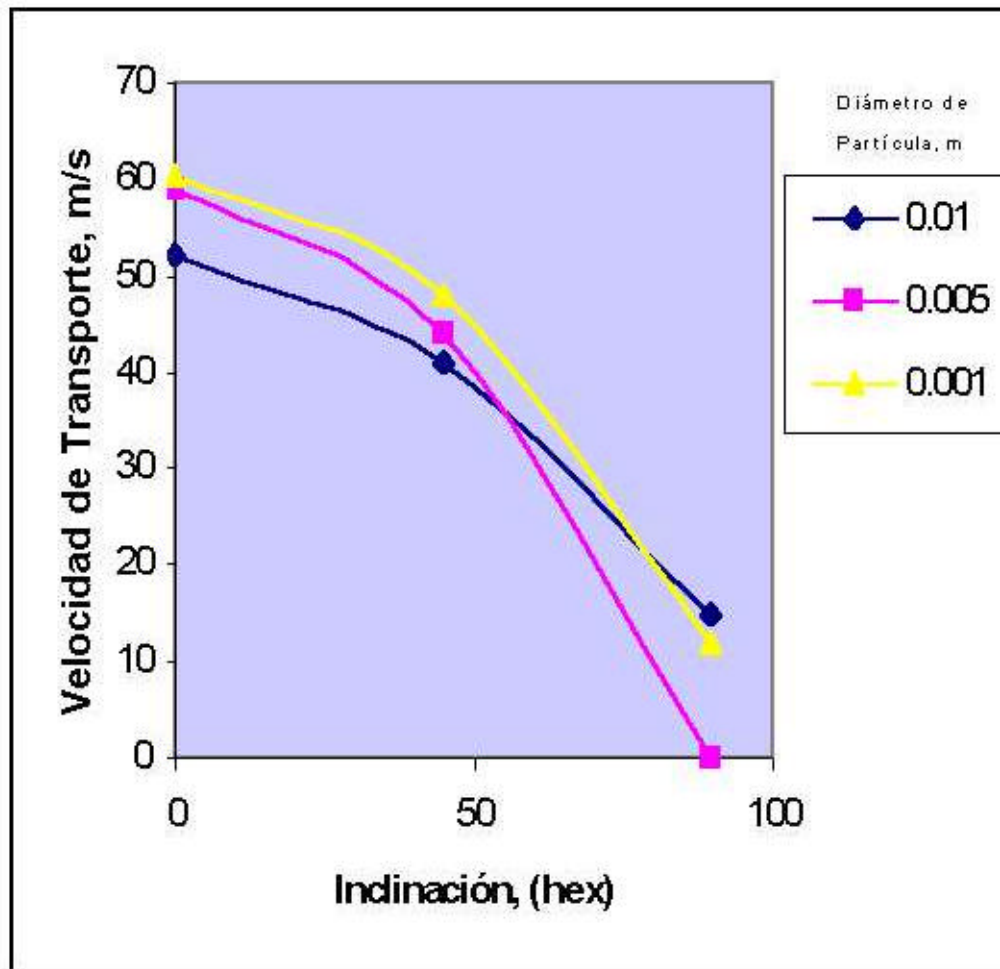


Figura 1. Velocidad de levantamiento de las partículas después del impacto del fluido de perforación en función del ángulo máximo de desvío y diferentes diámetros de partícula.

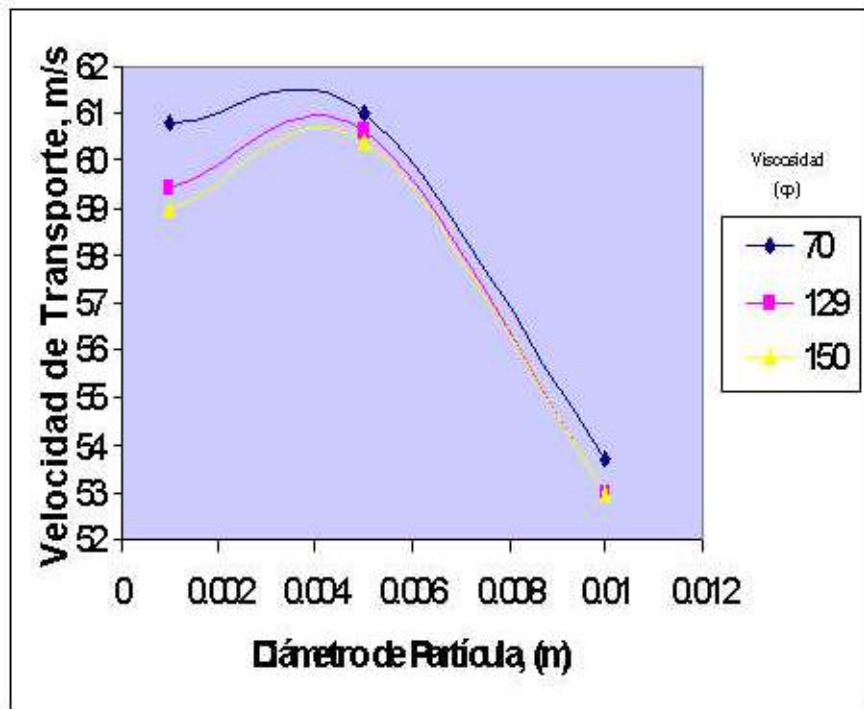


Figura 2. Velocidad de levantamiento de las partículas después del impacto del fluido de perforación en el fondo del pozo en función de su diámetro y de la viscosidad aparente del fluido de perforación para un gasto de 800 gpm.

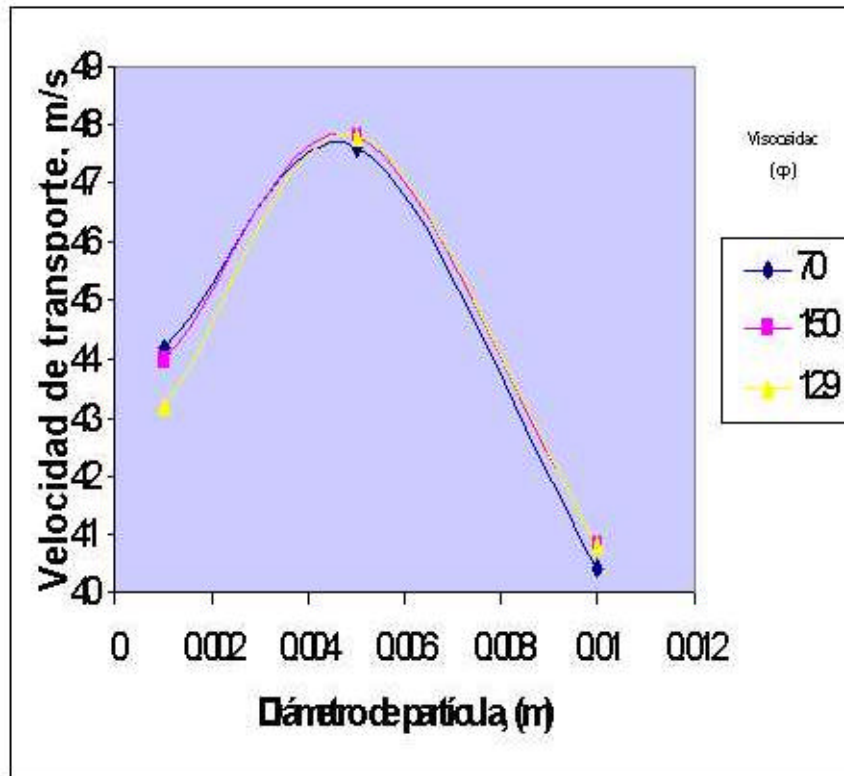


Figura 3. Velocidad de levantamiento de los recortes en el fondo del pozo después del impacto del fluido de perforación en función del diámetro de partícula para diferentes viscosidades aparentes del fluido de perforación y un gasto de 400gpm.

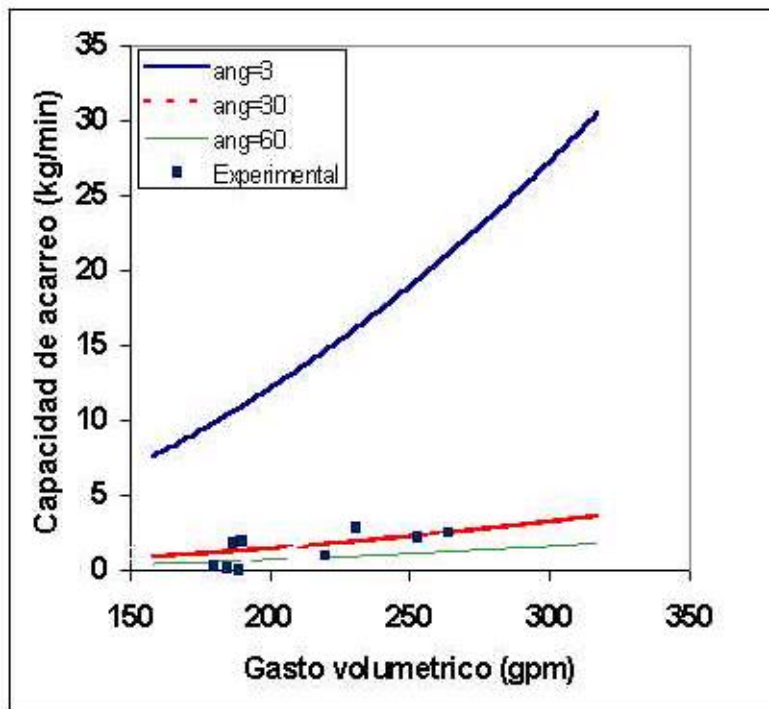


Figura 4. Capacidad de acarreo del fluido de perforación en función del gasto volumétrico para diferentes ángulos máximos de desvío y profundidades superiores a 3000m.

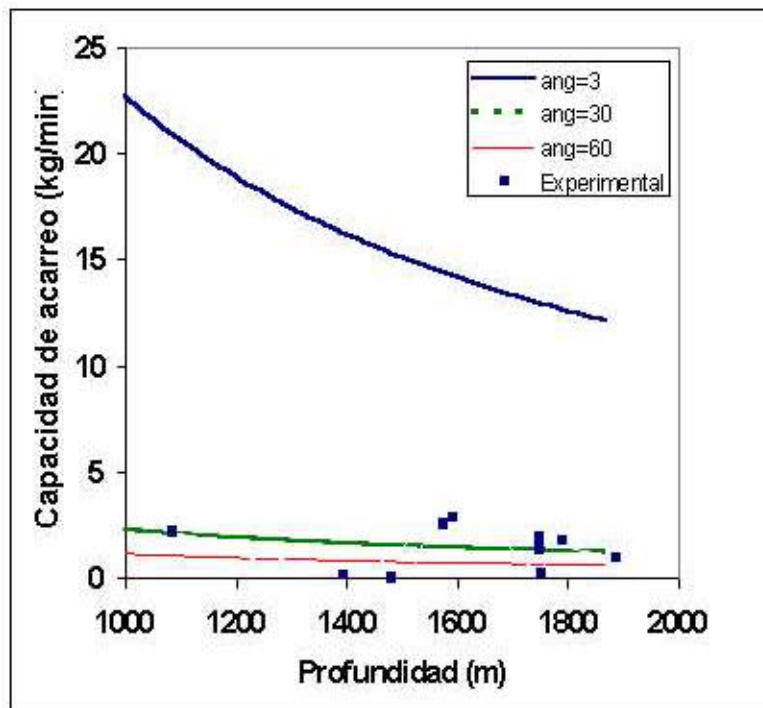


Figura 5. Capacidad de acarreo del fluido de perforación en función de la profundidad del pozo para diferentes ángulos máximos de desvío y un gasto de 400gpm..

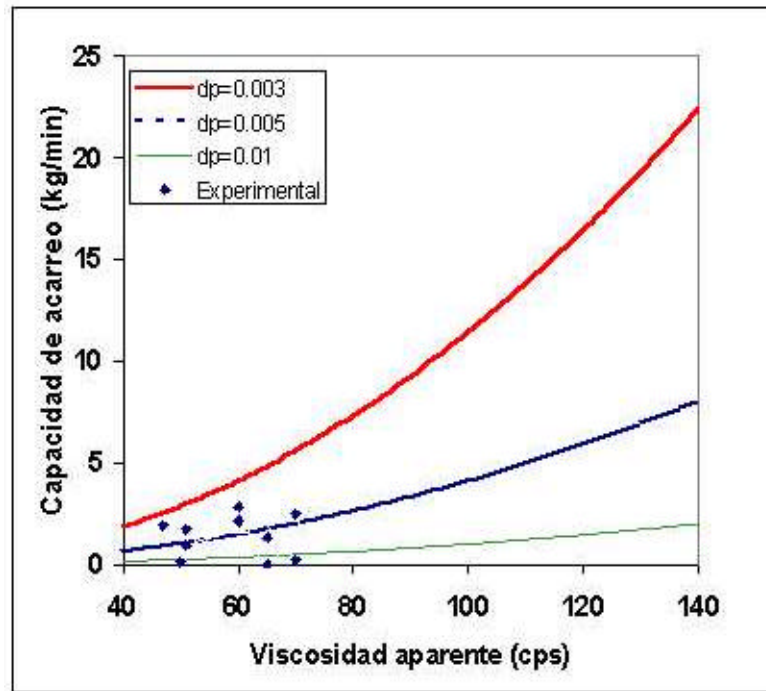


Figura 6. Capacidad de acarreo del fluido de perforación en función de la viscosidad aparente del fluido de perforación para diferentes diámetros de partícula generada.