

52
24



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CALCULO DEL RITMO DE ASENTAMIENTO
DE LOS CORTES PERFORADOS EN EL POZO

T E S I S

PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO PETROLERO

P R E S E N T A :

ALMA ROSA ZARATE RUIZ



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Cd. Universitaria, México, D.F.

1990



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INTRODUCCION

CAPITULO I

FACTORES QUE AFECTAN A LA CAPACIDAD DE ACARREO DEL CORTE POR EL FLUIDO DE PERFORACION

- 1.1 EFECTO DE LA GEOMETRIA DEL POZO
- 1.2 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION.
 - 1.2.1 PROPIEDADES REOLOGICAS
 - 1.2.2 DENSIDAD DEL FLUIDO
- 1.3 EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR
- 1.4 EFECTO DEL TAMAÑO Y FORMA DE LOS RECORTES
- 1.5 EFECTO DE LA CONCENTRACION DE RECORTES
- 1.6 EFECTO DE LA ROTACION DE LA TUBERIA DE PERFORACION
- 1.7 EFECTO DEL RITMO DE PENETRACION DE LA BARRENA

CAPITULO II

CORRELACIONES PARA CALCULAR LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LOS CORTES

- 2.1 CORRELACION DE PRESTON L. MOORE
- 2.2 CORRELACION DE ZSE FOO CHIEN
- 2.3 CORRELACION DE WALKER Y MAYES
- 2.4 CORRELACION DE HILDO ZEIDLER

CAPITULO III

PROGRAMAS DE COMPUTO

EVALUACION Y COMPARACION DE LAS CORRELACIONES

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

Entre las principales funciones del fluido que es utilizado en el proceso de la perforación rotaria se encuentra la de limpiar : el fondo del pozo, la barrena y el espacio anular, así, como transportar a la superficie los fragmentos de roca generados por la acción cortante de la barrena y que en terminos de campo son conocidos como recortes, esta ultima función es conocida como capacidad de acarreo de los fluidos de perforación.

Inicialmente se consideraba, que si la cantidad de sólidos removidos es menor que la generada, entonces invariablemente la velocidad anular o la viscosidad del fluido se debían incrementar. Esto daba como resultado una tendencia hacia el uso de los lodos viscosos y altas velocidades anulares. Sin embargo, esta práctica perjudica la acción de limpieza que realiza el lodo debajo de la barrena, por lo que es lógico esperar una reducción bastante significativa en el ritmo de penetración de la misma, que a su vez se convertirá en un incremento en los costos de operación.

La velocidad con la que los recortes son transportados depende de la velocidad de resbalamiento por lo que es necesario determinarla, para así establecer su mínimo valor requerido para el buen transporte de los recortes, evitando de esta manera las pérdidas por fricción debidas a la velocidad excesiva del fluido de perforación.

El propósito de esta tesis es evaluar los modelos sobre la capacidad de acarreo de los lodos, realizados por Preston L. Moore, Sze-Foo Chien, H. Udo Zeidler y R. E. Walker-T. M. Mayes, cuyos modelos son de los más empleados dentro de la ingeniería petrolera.

FACTORES QUE AFECTAN A LA CAPACIDAD DE ACARREO DEL
CORTE POR EL FLUIDO DE PERFORACION

El mecanismo de transporte de los recortes desde el fondo del pozo a la superficie, se encuentra estrechamente relacionado al proceso de asentamiento de los mismos, ya sea con fluidos en reposo o en movimiento, de los cuales, el último tiene mayor grado de importancia dentro de el tema tratado en este trabajo, el análisis de las teorías de sedimentación y la mecánica de los fluidos, junto con el mecanismo de transporte de los recortes, permitieron identificar los factores que afectan a la capacidad de acarreo de los lodos de perforación, que son los siguientes: geometría del pozo, propiedades físicas de los lodos, velocidad de flujo en el espacio anular, tamaño y configuración de la partícula, orientación de caída de la misma, ritmo de penetración de la barrena, velocidad de rotación de la tubería de perforación y la velocidad terminal de asentamiento de la partícula.

1.1 EFECTO DE LA GEOMETRIA DEL POZO

Es necesario conocer la geometría y la conformación estratigráfica del pozo, para que de esta forma se pueda diseñar y planear las características del fluido. Ya que si estas propician derrumbes o ampliaciones, podría presentarse que la velocidad anular en algunas zonas del sistema sufran un cambio repentino y significativo, que como consecuencia produzca una reducción de la velocidad de flujo hasta en un 50%.

En estas condiciones, los lodos con baja velocidad y baja viscosidad, presentan una carencia de poder viscosificante, disminuyendo así su capacidad de acarreo, debido a esto la predicción anticipada de un diámetro erosionado o derrumbe en el

pozo debe considerarse en el diseño del programa hidráulico de perforación.

Todos los fluidos no-newtonianos, en los cuales se encuentran incluidos los lodos de perforación, tienen características de flujo no lineales y requieren más de un término para definir su comportamiento viscoso al circular por diferentes áreas de flujo, tal es el caso que presenta la geometría del pozo. Es necesario conocer las dimensiones del mismo, para planear las velocidades anulares requeridas en cada una de las secciones.

Sifferman y colaboradores realizaron un estudio sobre el transporte de recortes con varias combinaciones de tamaños de tuberías de perforación y de revestimiento, con un rango normal de velocidades anulares. La diferencia en la capacidad de transporte entre cada combinación fue ligera, lo cual se muestra en la figura 1.1., que se realizó con lodos bentoníticos.

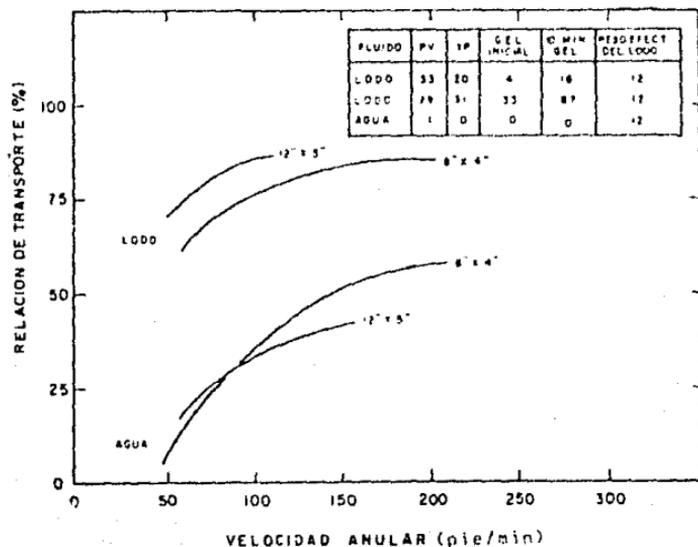


FIG. 1.1 EFECTO DE LA GEOMETRÍA DEL POZO SOBRE EL TRANSPORTE DE RECORTES. PARA RECORTES MEDIANOS, 100 RPM Y DENSIDAD DEL LODO 12 lb/gal.

1.2 EFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACION

1.2.1 PROPIEDADES REOLOGICAS

Numerosos intentos se han efectuado con el fin de correlacionar el esfuerzo gel y la viscosidad de un lodo con su capacidad de acarreo. Estos han fallado hasta cierto grado para revelar alguna relación definitiva. Sin embargo, se observan algunas condiciones generales, dadas por investigadores tales como Williams - Bruce y Hopkin. Este ultimo autor observó cierta tendencia a un marcado decremento en la velocidad de asentamiento, originado a su vez por un incremento en el valor del punto de cedencia o de la viscosidad. Estos resultados implicaron la necesidad del uso de velocidades anulares arriba de 120 pies/min., para limpiar el pozo con lodos de baja viscosidad. Mientras que a velocidades anulares del lodo, considerablemente más bajas, serian posibles y justificadas con lodos de alta viscosidad, debido a que las altas velocidades de flujo y viscosidades elevan el valor de las pérdidas de presión por fricción.

Hopkin además consideró que con el uso de programas de cómputo durante la perforación es posible prever las acciones correctivas para cuando sucedan ampliaciones o derrumbes en el pozo; siendo estas, las razones principales para incrementar la viscosidad sin necesidad de aumentar la velocidad anular.

Los cálculos realizados por algunos investigadores indicaron que para muchas condiciones normales de perforación, un cierto incremento en la viscosidad del lodo es suficiente para cambiar el patrón de flujo del fluido dentro del espacio anular, de turbulento a laminar.

Se cree que el incremento de la capacidad de acarreo observado en el campo puede ser relacionado al perfil de velocidad tipo parabólico que existe en las regiones de flujo laminar, aunado a la fuerza centrífuga adquirida por los recortes debido a la rotación de la tubería de perforación. Esto tiende a conservar a la partícula en la parte central de la zona de alta velocidad

dentro del flujo tipo parabólico.

Resultados similares fueron observados por Hall y colaboradores, quienes reportaron un decremento bastante significativo en la velocidad de asentamiento de los recortes, para la misma velocidad de flujo; si el patrón del flujo en el espacio anular cambia de laminar a turbulento.

Un lodo con alto esfuerzo de gel, por lo general será muy viscoso, pero lo inverso no es necesariamente cierto, un lodo con alta viscosidad tendrá un alto esfuerzo gel, si su viscosidad es debida a arcillas altamente dispersas, pero tendrá un esfuerzo gel menor o despreciable, si ésta es causada por alto contenido de sólidos inertes.

Por tales razones, los lodos que generalmente son utilizados en los experimentos y pruebas para determinar la aplicabilidad de los modelos, están relacionados con los fluidos de perforación de alta viscosidad-alto gel y a los de baja viscosidad bajo gel. Con frecuencia estos últimos son superiores a los primeros en lo que respecta a la remoción de los recortes, esto se encuentra ilustrado por las gráficas de la figura 1.2.1.

Las curvas permiten mostrar que los fluidos de baja viscosidad y gel transportan los recortes de menor tamaño a la superficie más rápidamente. Ya que éstos también acarrean grandes porcentajes de partículas a bajas velocidades de circulación.

Una excepción puede observarse en la gráfica C de la figura 1.2.1. Donde el fluido de propiedades altas logra acarrear un alto contenido de recortes, pero solo cuando estos son de gran tamaño. Sin embargo, no permite remover eficientemente los de menor dimensión. La gran ventaja que presentan los lodos que tienen bajas características es particularmente notable para los recortes de tamaño mediano, que son muy semejantes a los generados en la mayoría de las perforaciones efectuadas en la actualidad.

Este tipo de fluidos desafortunadamente no son tan representativos de los lodos modernos en cuanto a su comportamiento.

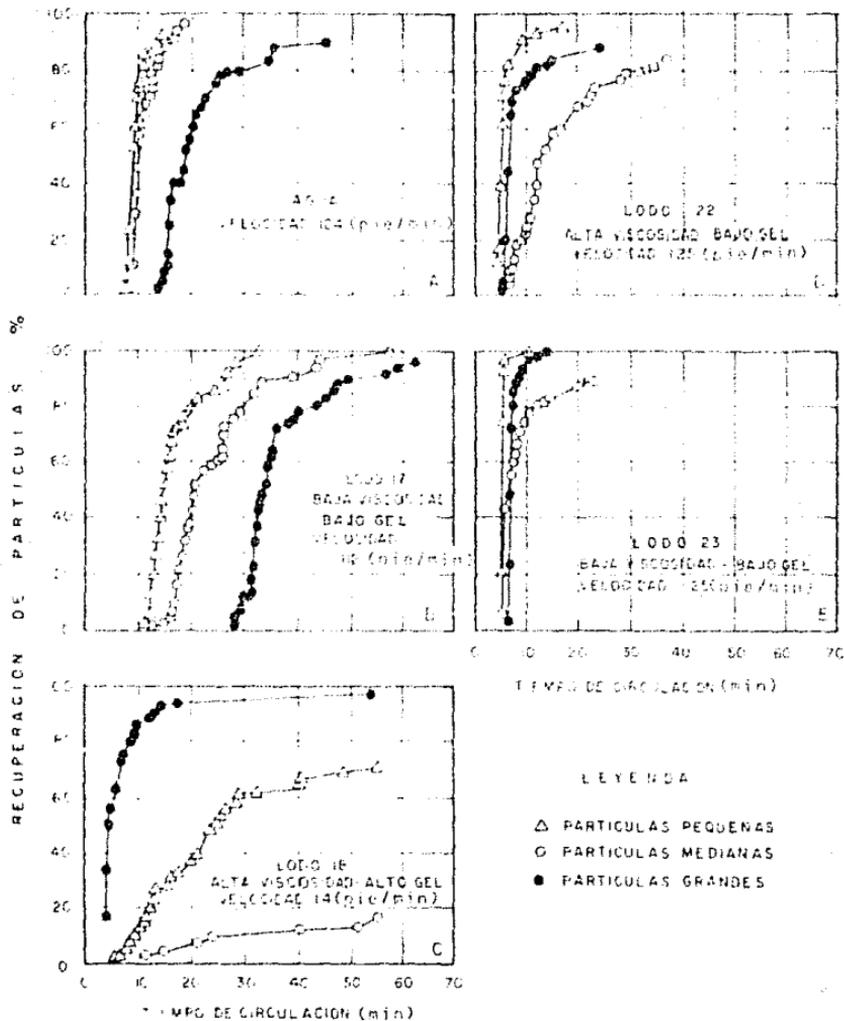


FIG. 1.2.1 EFECTO DE LAS PROPIEDADES DEL FLUIDO SOBRE LA CAPACIDAD DE ACARREO

En la figura 1.2.2. Se muestra la amplitud del rango común de las propiedades reológicas, además se observa una diferencia bastante significativa en el porcentaje de transporte de los diferentes fluidos. La curva del lodo viscoso alcanzó el 86% del nivel rápidamente, a partir de este momento declinó su pendiente con gran rapidez. La curva del lodo intermedio inicia con una pendiente alta hasta el 35% del nivel, para después continuar ascendiendo con lentitud. El lodo no viscoso alcanzó el 50% relativamente rápido, pero su declinación desde este punto en adelante fue grande, aun con velocidades altas. En general, la curva anterior a bajas velocidades muestra pendientes suaves y continuas al principio. El punto donde inician las curvas de transporte de cada una, esta muy próximo al valor de la velocidad de asentamiento terminal de los recortes.

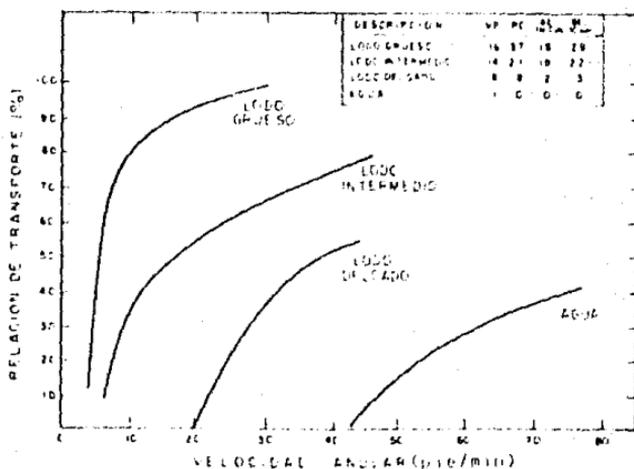


FIG. 1.2.2 REMOCION DE RECORTES CON LODOS DE DIFERENTES CONDICIONES REOLOGICAS Y VELOCIDAD ANULAR.

Casi en su totalidad los fluidos de perforación son no-newtonianos en su comportamiento, por lo que su viscosidad no es constante a través de las diferentes secciones del pozo. Esto plantea inmediatamente el problema de seleccionar un valor de viscosidad apropiado para el fluido empleado en la perforación. Obviamente si este tiene un punto de cedencia bastante alto para soportar a la partícula, la velocidad de caída de la misma se reducirá a cero, solo que en las condiciones de flujo esto es poco práctico.

Hall-Thompson-Huss y Hopkin indicaron que la intensidad con que cae la partícula decrece debido al incremento del punto de cedencia, pero hicieron notar que un exceso de este, afecta la optimización de la hidráulica en la perforación. En sus resultados experimentales, utilizando viscosímetros como secciones de prueba, mostraron que la viscosidad, es decir la viscosidad aparente a la que se ven sometidos los recortes, es mayor que la viscosidad plástica del fluido, lo cual se verificó en todas las velocidades probadas, además la diferencia entre ambas, decrece al incrementarse estas, pero no significativamente.

1.2.2 DENSIDAD DEL FLUIDO

Incrementando la densidad de un fluido de perforación, mientras que sus otras propiedades se conservan lo más constante posible, da como resultado, una mejoría en la capacidad de acarreo, lo cual puede observarse claramente en las gráficas de la figura 1.2.2.1. Sin embargo, es difícil lograr este objetivo, debido a que surgen otros problemas que más tarde se analizarán.

La figura 1.2.2.2. Muestra los resultados obtenidos con los lodos de 12 y 15 lb/gal utilizando partículas de tamaño mediano. La densidad del lodo tiene un efecto moderado sobre el transporte de los recortes a través del espacio anular. A velocidades anulares bajas existe una mayor divergencia entre las curvas, mientras que a mayores velocidad se acercan más una a otras.

Hopkin notó que este efecto puede determinarse con una exactitud razonable mediante el uso del principio de flotación. La figura 1.2.2.3. ilustra el cálculo del efecto de la densidad del fluido sobre la velocidad de asentamiento de una partícula, donde esta última está expresada como un porcentaje de la velocidad de la misma partícula, en el agua. Por ejemplo, si la densidad de aumenta 8.8 a casi 15 lb/gal, se puede lograr reducir la velocidad de asentamiento aproximadamente al 50% de la presentada en el agua. Sin embargo, a menos que esta última densidad del lodo se requiera para contener las presiones ejercidas por la formación del pozo, este procedimiento es probablemente una solución impráctica para mejorar la capacidad de acarreo, ya que podrían ocasionarse otros tipos de problemas.

Cuando la densidad del lodo excede las 15 lb/gal, la única función de la viscosidad es soportar las partículas de barita, por consecuencia la velocidad de asentamiento de la partícula sería muy baja con lodos pesados como los de este rango. Una forma de comprenderlo es realizando un experimento bastante práctico que consiste en tirar una pequeña cantidad de recortes en una cubeta que contenga un fluido de 15 lb/gal o más pesado, se observará que su caída es más lenta, lo que es debido a la menor diferencia entre las densidades de estos.

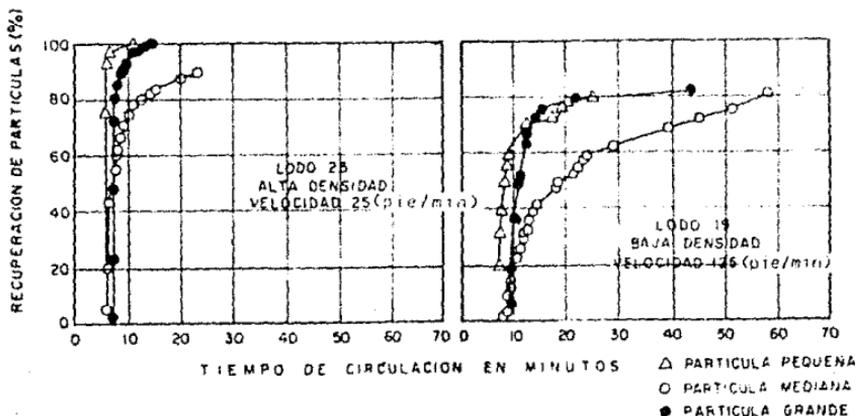


FIG. 1.2.2.1 EFECTO DE LA DENSIDAD DE LA PARTICULA SOBRE LA CAPACIDAD DE ACARREO.

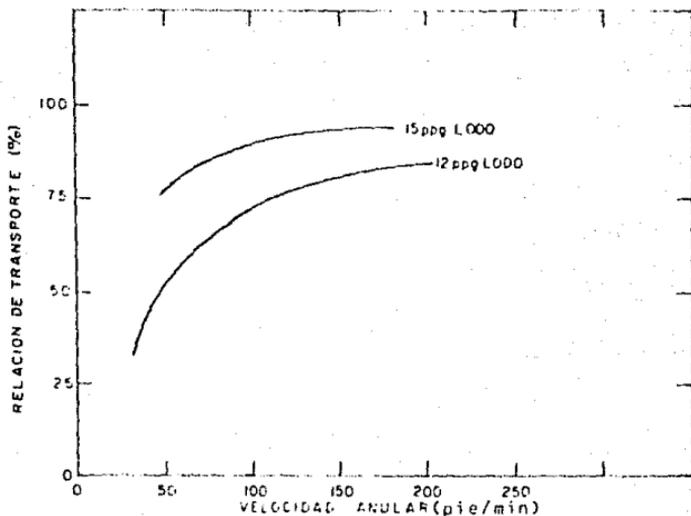


FIG. 1.2.2.2 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL LODO SOBRE LA CAPACIDAD DE ACARREO (RECORTES MEDIANOS, SIN ROTACION, ESP. ANGULAR 8" x 4").

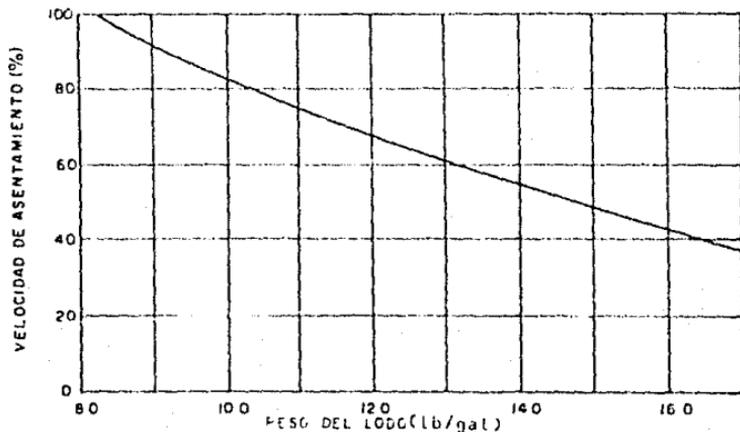


FIG. 1.2.2.3 EFECTO DE LA DENSIDAD DEL LODO SOBRE LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO.

1.3 EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR

Existen muchos casos donde las velocidades anulares altas no son deseadas o no están disponibles: por lo cual la velocidad anular se debe disminuir para que se realice el transporte de los recortes de la manera más óptima. También puede restringirse para minimizar la densidad equivalente de circulación o para mantener un flujo laminar adecuado en el espacio anular.

Si la velocidad de asentamiento en régimen turbulento es alta para la velocidad anular, las propiedades viscosas del fluido deberán incrementarse hasta que la partícula caiga en un régimen transitorio o laminar donde la viscosidad tiene un mayor rendimiento dentro del concepto transporte.

Williams y Bruce demostraron que velocidades de flujo menores de 200 pies/min., son suficientes, para remover los recortes del fondo del pozo, usando agua como fluido de circulación y recortes de diferente diámetro se efectuaron pruebas a una velocidad de 124 pies/min.; donde se observaron que algunas partículas ascendieron con velocidad neta de 10 pies/min., siendo este el menor valor; esto pone de manifiesto la posibilidad de reducir apreciablemente la velocidad anular y aún de mantener la remoción de los recortes, de una manera eficiente. La figura 1.3.1. Muestra como la relación de transporte se incrementa rápidamente con la velocidad de circulación pero después empieza a incrementarse con un ritmo más lento dentro del rango de velocidad de 100 a 200 pies/min.

Estos resultados fueron obtenidos de un lodo con lignosulfonato, pero de comportamiento similar a uno común. Para fluidos de mayor viscosidad, el punto superior de ruptura ocurre a velocidades más bajas, lo cual indica que este parámetro no incrementa efectivamente la capacidad de acarreo, ya que a mayor velocidad de circulación corresponden mayores caídas de presión por fricción, afectando de esta manera el uso de criterios de máxima potencia en la barrena y máximo impacto sobre la misma, resultando así una operación ineficiente.

Sifferman recomendó usar velocidades menores de 50 pies/min.

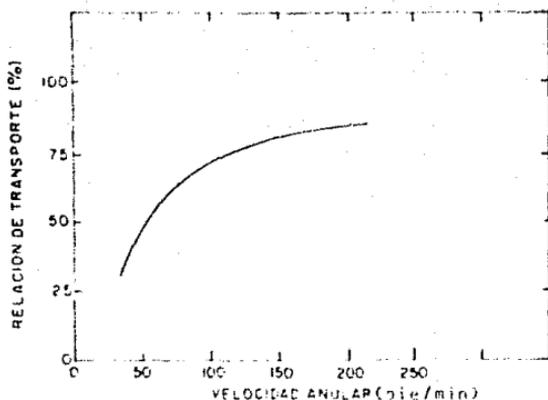


FIG. 1.3.1 INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE ACARREO CON LA VELOCIDAD ANULAR.

para lodos bentoníticos. También sugirió que al usar lodos de tipo polímero de baja viscosidad debía de tenerse una velocidad de 120 pies/min., para lograr una limpieza adecuada del pozo; mientras que para lodos del mismo tipo, pero de alta viscosidad las velocidades anulares menores de 90 pies/min., son suficientes.

Se ha demostrado que la velocidad anular puede elevarse si el tamaño del recorte, el ritmo de penetración de la barrena o el diámetro de la tubería de perforación se incrementan, y puede reducirse si la concentración de recortes en el espacio anular, la presión equivalente de fondo de la mezcla circulante, el diámetro de la tubería de revestimiento, el diámetro del agujero, la densidad del lodo o la relación de esfuerzo de cedencia sobre la viscosidad plástica, experimentan un incremento en su valor. En aplicaciones prácticas el conocimiento de las condiciones de ampliación o derrumbes en el pozo y el perfil de las prestaciones de formación son muy útiles para determinar las velocidades anulares del sistema en cuestión.

El concepto convencional de este parámetro no considera el volumen de recortes en el espacio anular, por lo que una derivación de la misma, corregida por un factor en función de la concentración, proporciona una velocidad más representativa de las condiciones existentes en el fondo del pozo. Ahora bien, la corrección es por una cantidad igual a la fracción del volumen de los recortes en el espacio anular, la cual se ha establecido en un 5% de acuerdo con el trabajo desarrollado por Hopkin. Por ejemplo una velocidad real de 90 pies/min., para una concentración de recortes del 5%, es igual a una velocidad convencional de 90 pies/min., por la diferencia del 100% menos la concentración, da como resultado 85.5 pies/min. Sin embargo, esta observación se pasa por alto, por lo que comunmente se obtienen valores altos de la velocidad anular. Considerando que un incremento en esta, para un ritmo de penetración de la barrena dado, produce dos efectos opuestos que afectan a la presión de fondo en el pozo; la cual decrece debido a una reducción en la concentración de los recortes en el espacio anular, mientras que se incrementa por la presión de fondo debida al flujo.

Por lo tanto es posible obtener una velocidad a la cual la presión de fondo sea mínima y que la máxima limpieza del agujero y el uso más eficiente de la acción de corte de la barrena, pueden alcanzarse cuando la presión de fondo producida por la mezcla circulante de lodo y recortes se reduce a un mínimo. La velocidad anular correspondiente a la misma presión, se define como: velocidad anular óptima.

En las figuras 1.3.3. y 1.3.4., muestran como este factor tiene quizás el mayor o uno de los más grandes efectos sobre la capacidad de acarreo de los fluidos de perforación. El efecto que tiene es significativo a bajas y medianas velocidades, solo despreciable a altas velocidades de flujo. Al comparar las gráficas anteriores, se observa que incrementando la relación del punto de cedencia sobre la viscosidad plástica, pero conservado la misma viscosidad aparente y velocidad anular, la concentración de recortes en el espacio anular tiende a disminuir.

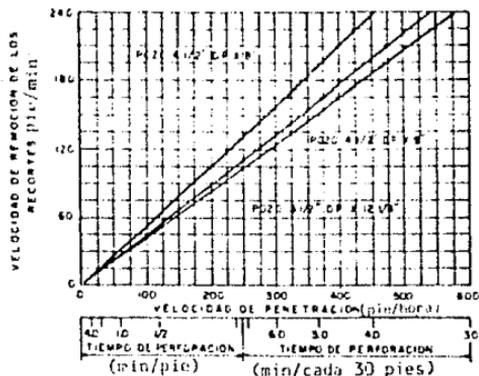


FIG. 1.3.2 VELOCIDAD DE REMOCION DE LOS RECORTES Vs. VELOCIDAD DE PENETRACION (CONCENTRACION DE RECORTES DEL 5%).

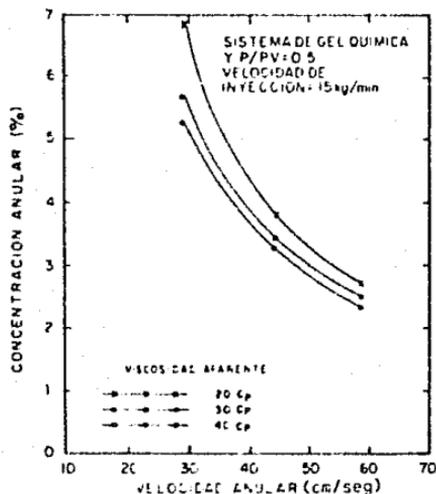


FIG. 1.3.3 EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR SOBRE LA CONCENTRACION DE RECORTES EN EL ESPACIO ANULAR CON LODOS DE GEL QUIMICA.

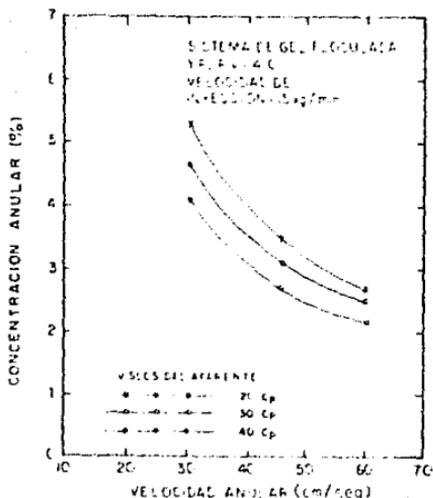


FIG. 1.3.4 EFECTO DE LA VELOCIDAD ANULAR SOBRE LA CONCENTRACION DE RECORTES EN EL ESPACIO ANULAR CON LODOS DE GEL FLOCULADA.

1.4 EFECTO DEL TAMAÑO Y FORMA DE LOS RECORTES

En ausencia de una distribución de la velocidad en el espacio anular, una partícula caerá a través de un fluido con su mayor área transversal, perpendicular a la dirección del movimiento del mismo. Esto es un hecho experimental conocido desde antes del siglo XX. Para una partícula esférica, es independiente de la orientación que esta tenga, por lo tanto, la distribución de velocidad tendrá un efecto totalmente nulo. Sin embargo, los recortes generados en las operaciones de perforación rotaría rara vez poseen una forma esférica o regular.

Para partículas con forma de disco, el área transversal depende de la dirección del flujo existente. Se ha demostrado mediante experimentos de laboratorio, que la orientación de la partícula cuando el fluido está en un régimen de flujo laminar se ve afectada por la relación de espesor-díametro de la

partícula. Cuando esta relación se encuentra entre 0.3 y 0.8, la partícula es comúnmente transportada en posición horizontal. Cuando esta misma relación es mayor de 0.8, la partícula adquiere una posición de canto. Si la relación es menor de 0.3, la orientación es inestable, ya que la partícula gira de una posición horizontal a una de canto, esto se debe al exceso de torsión y a la distribución de las velocidades del fluido en flujo laminar. Estos cambios se repetirán un número indeterminado de veces a través de todo el recorrido que efectuará la partícula en el espacio anular.

Cuando las condiciones que presenta el fluido son de flujo turbulento, la orientación de la partícula es aparentemente independiente de la relación espesor diámetro, ya que el perfil de velocidades presente en este tipo de régimen tiene una distribución plana.

La parte A de la figura 1.4.1., muestra los resultados obtenidos con diferentes relaciones en régimen turbulento. Las partículas más pequeñas tienen una relación de 0.25, las medianas de 0.17 y las mayores de 0.25 en adelante. Se observa que la velocidad de asentamiento de una partícula con una relación de espesor sobre diámetro menor de 0.3, en flujo laminar es muy difícil de predecir, debido a su caprichosa trayectoria de ascenso, a través del espacio anular.

Como un intento para mejorar el estudio de comportamiento de las partículas respecto a su tamaño, Zeidler reconoció la necesidad de una caracterización geométrica de los recortes, con el fin de clasificarlos y de esta forma entender con mayor facilidad su mecanismo de transporte. Propuso que la clasificación estuviera de acuerdo a sus tres dimensiones mayores, así como su configuración física.

En la práctica, el diámetro de una partícula puede ser estimado en forma visual, pero si se requiere mayor precisión, el diámetro equivalente puede determinarse mediante un análisis de mallas.

Ahora bien, con respecto a la distribución de velocidades en flujo laminar, el incremento en la velocidad de la partícula va de

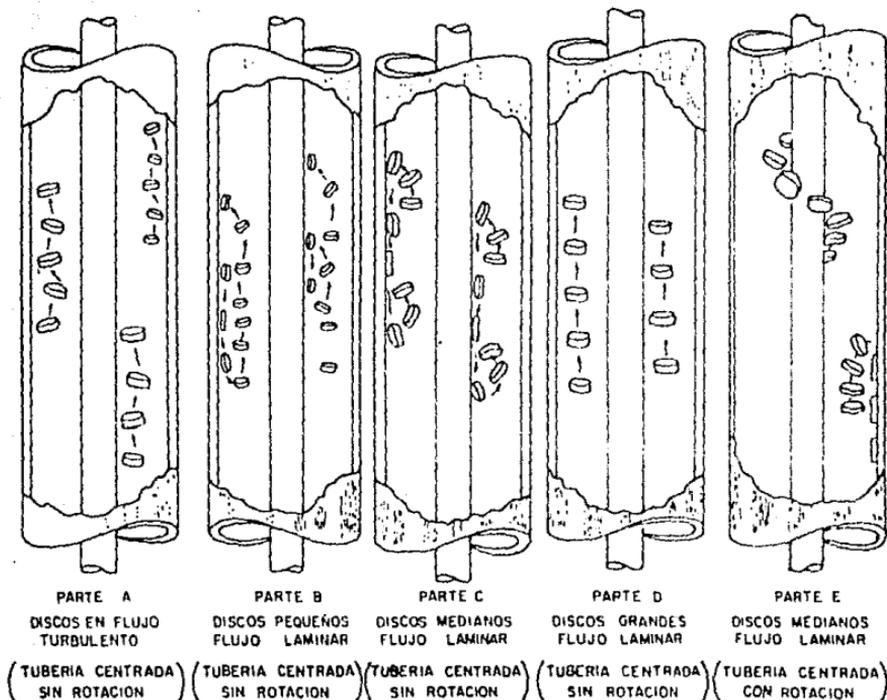


FIG. 1.4.1 COMPORTAMIENTO DE RECORTES DE DIFERENTE TAMAÑO EN DIFERENTE TIPO DE FLUJO Y CON TUBERIA DE PERFORACION CON O SIN ROTACION

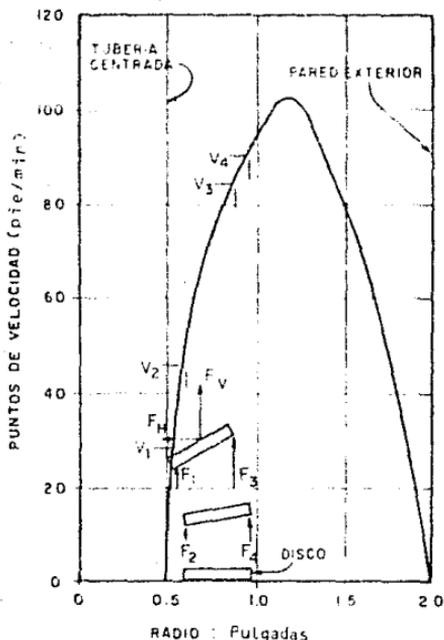


FIG. 1.4.2 EFECTO DEL TORQUE SOBRE UNA PARTICULA EN FLUJO LAMINAR.

cero en la pared a un máximo en las proximidades del centro de la corriente del fluido en el espacio anular, en la figura 1.4.2., describe en forma gráfica este fenómeno.

La actitud natural de una partícula plana que cae en el seno de un fluido estático es horizontal, es decir, su mayor dimensión esta orientada perpendicularmente a la dirección de su caída. Esta misma actitud es adoptada en un fluido ascendente en flujo laminar, tomando en cuenta la distribución de velocidad, para las dimensiones finitas del sistema. Como la fuerza ejercida por el fluido sobre la partícula es directamente proporcional a la velocidad del fluido, así como también, en flujo laminar la velocidad es mayor en el centro, la fuerza también se incrementa de cero a un máximo de la pared al centro en el espacio anular. Puesto que una partícula en posición horizontal durante

su trayecto por el espacio anular es proyectada a través de regiones de diferente velocidad, tal como se ilustra en la figura 1.4.2., donde $F_1 > F_2$, lo anterior es debido a que $V_1 > V_2$, produce un esfuerzo que tiene como origen el centro de gravedad de la partícula ocasionado por la acción de estas fuerzas que son de diferente magnitud, de tal manera que la partícula tiende a girar y también a desplazarse de la zona de mayor a la de menor fuerza, es decir, hacia el exterior de la corriente.

Como la partícula tiende a inclinarse, la componente de fuerza horizontal se hace efectiva y presente sobre la partícula. La combinación de éste con el torque la empujan contra la pared, donde la fuerza ascendente es mínima, por lo que empieza a deslizarse hacia el fondo del pozo.

Si el gradiente de velocidad en la pared es suficientemente grande, la partícula será desalojada y regresará a la zona de máxima velocidad, donde el ciclo se repetirá un sinnúmero de veces hasta que llegue a la superficie. La ilustración de este ciclo se muestra en la parte C de la figura 1.4.1. Si la partícula es delgada y la fuerza ejercida sobre ella en contra de la pared es suficientemente grande, la partícula seguirá cayendo sujeta a esta o en su defecto adherida en ella.

Como la acción ejercida por el torque sobre la partícula reduce la capacidad de acarreo es deseable que su efecto sea minimizado, lo que se puede lograr disminuyendo la velocidad anular y manteniendo el flujo laminar en las secciones superiores, donde la fuerza de arrastre en su mayor parte la proporcionan las propiedades viscosas del fluido y con flujo turbulento en las secciones donde existen áreas reducidas, tal es el caso de la zona de corte de la barrena y de los lastrararenas, ya que en estas los torbellinos propios de este tipo de régimen, son quienes evitan o contrarrestan la fuerza que obliga a los recortes a fijarse a la pared del pozo y a las herramientas.

El efecto de torsión de la partícula se considera la causa de que los recortes cambien de posición cuando son transportados por los fluidos en flujo laminar, pero la consideración de algunos conceptos utilizados en la hidráulica proporcionan una buena

explicación de la causa del giro ejercido por el torque sobre la partícula.

Las líneas de flujo en régimen laminar cuando el fluido esta en movimiento pueden ser consideradas como un grupo de cilindros concéntricos de espesor infinitesimal; los cilindros en cuestión son configurados por líneas fuentes individuales, que pueden estar presentes en el fluido en formas de largas venas longitudinales. La fuerza ejercida sobre una lámina perpendicular por la vena del fluido esta dada por $F = W V/Gc$; donde F es la fuerza sobre la lámina o recorte, W es el peso del fluido en contacto con el recorte por unidad de tiempo, V es la velocidad del fluido y Gc es la constante gravitacional. Un incremento en la velocidad multiplica la fuerza ejercida sobre el recorte.

El hecho de que el comportamiento de los recortes transportados por un fluido dependa de sus dimensiones, tuvo como consecuencia la investigación de los efectos de éstas sobre el comportamiento de los recortes. La conclusión a la que se llegó fue de que este fenómeno podía predecirse favorablemente si su relación espesor-diámetro es conocida.

La investigación se realizó con recortes de aluminio y otros materiales con diámetros de $3/4$ y $1/2$ pulgada, así como de varios espesores para de esta forma determinar el valor critico de su relación, bajo el cual el efecto de torque en una distribución de velocidad en régimen laminar giraría los recortes a una posición de canto. Este trabajo fue realizado por diferentes investigadores, todos concluyeron que los recortes cambiaban continuamente si su relación era menor de 0.3 y que los utilizados para este caso, con relaciones mayores de 0.8, caían de canto, mientras eran transportados hacia la superficie. Este fenómeno parece incomprensible ya que cuando un plano esta pasando a través del centro de un recorte paralelo al eje del mismo y su relación es mayor de 0.78, del área del plano que es interceptado por el recorte, es mayor que la de una de sus caras circulares.

Como se mencionó previamente, la partícula cae de tal manera que el área mayor es normal a la dirección de la caída; y las partículas con un rango de su relación espesor-diámetro entre 0.3

y 0.8, comunmente caen en forma horizontal.

Las partículas con una relación menor de 0.3 son difíciles de remover del agujero, debido a que con facilidad son adheridas a las paredes del pozo por las fuerzas de flujo del fluido, aún cuando estas sean débiles, ya que este tipo de partículas son delgadas y de menor peso. Cuando estas partículas se encuentran en grandes cantidades, el régimen de flujo debe mantenerse turbulento, para que de esta forma se logre mantener la capacidad de acarreo del fluido bajo este tipo de circunstancias.

Williams y Bruce demostraron en pruebas realizadas en el campo la dificultad de remoción de las partículas de tamaño mediano, la explicación a este problema es la baja relación espesor-diámetro de 0.187, esto hace que giren a una posición de canto por efecto de la torsión ocasionado por el movimiento de rotación de la tubería de perforación, un vez de lado, las partículas se deslizan hacia el fondo del pozo debido a su propio peso, en ocasiones las partículas se pegan a las paredes y cuando logran separarse de las paredes del pozo vuelven a adquirir una posición horizontal, siendo transportadas más arriba que de donde habían caído. Esto no quiere decir que estas partículas sean transportadas a la misma distancia a través de cada ciclo que se produzca en todo su trayecto a la superficie. Este fenómeno es más notable en lodos altamente viscosos, lo cual es de esperarse, debido a que son capaces de comunicar más el momento de giro ejercido por la rotación de la sarta de perforación.

Como las partículas de tamaño mediano son transportadas hacia arriba a una mayor distancia que aquellas que tienen una relación de 0.3, es de esperarse que estas últimas tarden más tiempo en ser transportadas, pero como son las que más se asemejan a los recortes reales producidos por las condiciones actuales de perforación y que además tienen un comportamiento más representativo de estos, se otorga mayor prioridad a los lodos de perforación que logran transportar el más alto porcentaje de los mismos. También cabe mencionar que las partículas más grandes fueron transportadas con mayor facilidad que las medianas en el intervalo inicial, pero no son tan representativas como las anteriores.

1.5 EFECTOS DE LA CONCENTRACION DE RECORTES

Sifferman indicó que no existe una tendencia del efecto de la concentración de los recortes sobre la relación de transporte, para apoyar esto, desarrolló la gráfica que se muestra en la figura 1.3.3., en la que indica la concentración de recortes en porcentaje del volumen contra la relación de transporte. De acuerdo a esta, el efecto de este parámetro es menor en el rango de 0 al 6% del volumen, el cual cubre con eficiencia las condiciones usuales de perforación.

Experiencias de campo indican, que durante la perforación a bajas profundidades, con lodos de baja viscosidad, se requieren velocidades anulares altas, para el mejor ascenso de los recortes y la limpieza adecuada del agujero. Piggott indica que la máxima concentración de recortes permitida, excluyendo los sólidos normales del lodo es de 5% con la cual se logran prevenir posibles problemas en el pozo. Algunas confirmaciones de este criterio se presentan al estudiar las condiciones de perforación de formaciones o estratos superiores, los que generalmente son blandos y poco compactos, para los cuales se utiliza agua como fluido de perforación. En estos, un problema común se presenta cuando la concentración de los recortes aumenta, produciendo con esto un incremento en la presión de fondo calculada, que es ejercida por la columna hidrostática del fluido, la que a su vez causa problemas de fracturas en zonas críticas, mayor volumen de filtrado inicial, pérdidas de sustentación, etc. Sin embargo, el problema más grave lo representan las pegaduras de tubería de perforación en las zonas de áreas reducida.

Otra dificultad que se presenta cuando la concentración de recortes en el espacio anular es mayor del 5% ocurre en las operaciones de conexión y desconexión de tubería, cuando se interrumpe la circulación del fluido; en este momento, si el fluido no es capaz de sostener los recortes estos tenderán a descender, formándose baches de sólidos, los cuales aumentan el peligro de pegaduras de tubería o "embolamiento" de la barrena.

El riesgo es mayor cuanto mayor sea el tiempo de interrupción de la circulación de bombeo.

Bajo condiciones constantes, la velocidad de flujo ideal de los recortes a través del espacio anular debe ser igual a la velocidad con que se están generando en el fondo del pozo debido a la acción de corte de la barrena, el ritmo de penetración promedio de la misma y de la velocidad de transporte del lodo.

La velocidad de penetración promedio, R_p , tiene por lo tanto una estrecha relación con el valor de la concentración de los recortes en el fluido de perforación, C_x , tal como se muestra en la siguiente expresión matemática:

$$C_x = \frac{R_p}{V_{MC} \left[1 - \left(\frac{D_p}{D_H} \right)^2 \right]} \quad \dots\dots 1.5.1$$

En donde:

- C_x = Es la concentración de los recortes en el espacio anular [% VOL]
- R_p = Es el ritmo de penetración promedio [pies/min].
- V_{MC} = Es la velocidad anular del lodo [pies/min].
- D_p = Diámetro de la tubería de perforación [pgl].
- D_H = Diámetro del agujero [pgl].

1.8 EFECTO DE LA ROTACION DE LA TUBERIA DE PERFORACION

Es importante poder definir que la mayoría de las ecuaciones desarrolladas en los modelos matemáticos para la predicción de la capacidad de acarreo de los recortes, no involucra la velocidad de rotación de la tubería de perforación.

La rotación de la tubería de perforación desarrolla un movimiento circular sobre el fluido en el espacio anular, resultando así una fuerza centrífuga que afecta a los recortes en tal forma que estos son obligados a emigrar lejos de la tubería y adquieren una trayectoria helicoidal ascendente a través del espacio anular.

Se ha observado que en flujo turbulento, el ascenso de estos no se ve afectado por la rotación de la tubería, mientras que en flujo laminar la rotación incrementa la capacidad de transporte. Esto sucede porque en este régimen, la velocidad y su perfil de flujo son tales que la fuerza centrífuga es lo suficientemente grande para enviar a los recortes hacia la región de alta velocidad de flujo.

En pruebas realizadas por Williams y Bruce con tubería sin centrar y sin rotación, se observó que el porcentaje de recortes transportados a la superficie eran muy bajos, lo que fue atribuido a la canalización del fluido y el entrapamiento subsecuente de las partículas en las zonas donde la tubería se recarga sobre la pared del agujero y en las que tienen poca área de flujo.

Cuando la tubería se centró la recuperación de los recortes aumentó, pero cuando la tubería fue puesta en rotación, resultó un mayor incremento.

Aún cuando la rotación de la tubería de perforación sea normal, su importancia en la remoción de los recortes debe ser enfatizada. La curva de porcentaje de recuperación contra el tiempo de circulación es una buena prueba para demostrarlo, como se observa en la figura 1.8.1., en la que durante periodos sin rotación, casi no aparecían partículas en la superficie, y en los periodos de rotación las partículas fueron removidas rápidamente del agujero. Tal efecto fue más pronunciado con los fluidos de

alta viscosidad y alto esfuerzo gel. La variación de la velocidad de rotación de 35 a 150 rpm, produjeron cambios poco apreciables en la recuperación de partículas. Por tal motivo, las velocidades normales de rotación utilizadas en los pozos petroleros son suficientes para obtener las ventajas ofrecidas por este factor.

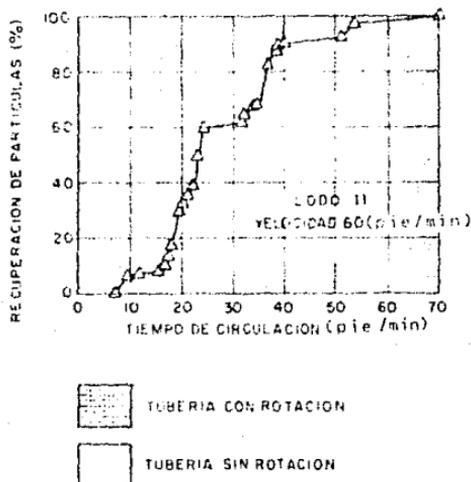


FIG. 1.6.1 EFECTO DE LA ROTACION DE LA TUBERIA DE PERFORACION SOBRE LA RECUPERACION DE RECORTES.

Como ya se había mencionado, la rotación de la tubería en flujo laminar envía a las partículas a las zonas de alta velocidad. En los experimentos realizados por Williams y Bruce, las partículas medianas y pequeñas manifiestan más el efecto de este fenómeno, resultando lógico que fueran transportadas con mayor rapidez a la superficie que las de mayor tamaño. La parte E de la figura 1.4.1., ilustra el efecto de la rotación de la tubería de perforación sobre el transporte de las partículas.

La efectividad de este factor en el incremento de la capacidad de acarreo es causada en gran parte por la turbulencia

que se forma alrededor de la superficie de la tubería, la cual impide que se adhieran las partículas a las paredes de la misma, de esta forma ayuda a la prevención de pegaduras de tubería y embolamientos de la barrena.

1.7 EFECTO DEL RITMO DE PENETRACION DE LA BARRENA

Este es uno de los factores que requiere una descripción más analítica bajo el criterio de optimización, logrando así una mejor realización y economía en las operaciones de perforación.

Como ejemplo: la gráfica 1.7.1, está definida para un lodo en particular, donde cada valor del costo por pie perforado es obtenido con distintas velocidades angulares. Con el fin de proporcionar una mayor comprensión sobre la selección de la velocidad óptima en función del ritmo de penetración, se trazan las curvas de costo por pie perforado obtenida para cada conjunto de condiciones establecidas. La ecuación que define estas curvas es:

$$CF = \frac{C_b + C_r (T_r + T_t + T_c)}{R \cdot T_r} \quad \dots \quad 1.7.1$$

donde:

R = Es el ritmo de penetración de la barrena (pie/hr).

T_r = Tiempo de rotación (hr).

T_t = Tiempo de viaje (hr).

T_c = Tiempo de conexión (hr).

C_b = Costo de la barrena (\$).

C_r = Costo de renta del equipo (\$/hr).

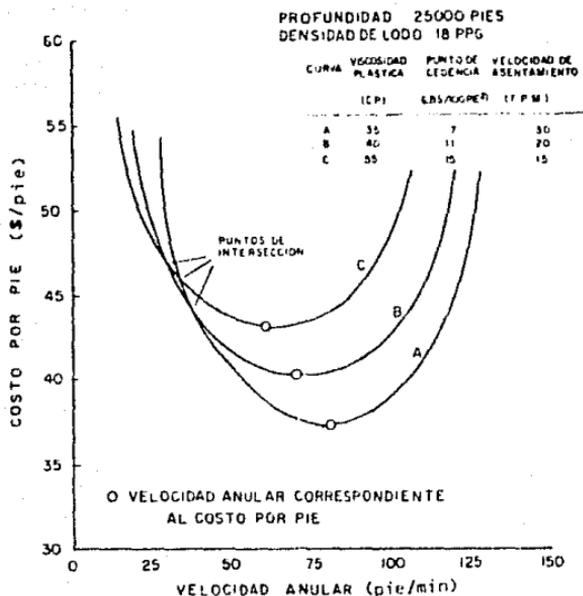


FIG. 1.7.1 COSTO POR PIE Vs. VELOCIDAD ANULAR

En la ecuación anterior el ritmo de penetración, (CR), se predijo utilizando el modelo de Burgoyne y Yung. El cual establece la relación que existe entre este parámetro, la máxima fuerza de impacto, (F_j), y la densidad equivalente de circulación del fluido de operación utilizando (ρ_c):

$$R \propto \frac{-a(\rho_c - G_p)}{F_j} \quad \dots \quad 1.7.2$$

La ecuación anterior muestra la declinación exponencial que sufre el ritmo de penetración con los incrementos en la presión diferencial a través del fondo del agujero.

El ritmo de penetración de la barrena es importante para la predicción y control de la concentración de recortes en el espacio anular, la densidad equivalente de circulación y por último la relación de transporte. Esta última es función de la velocidad de asentamiento de la partícula.

CORRELACIONES PARA CALCULAR LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LOS CORTES.

Las correlaciones para la capacidad de acarreo de los fluidos de perforación, están definidas para calcular la velocidad de asentamiento de la partícula, la cual, es la velocidad con la que cae una partícula a través del seno de un líquido. Es aquí donde las características físicas del fluido y la geometría de la partícula toman un papel muy importante para su determinación.

Es necesario definir que las correlaciones han sido desarrolladas para diferentes condiciones o patrones de flujo, tales como flujo turbulento y laminar, además que algunas consideran las condiciones de flujo transicional. A través de las experiencias de campo y por experimentos recientes, se ha comprobado que las velocidades anulares bajas, son más deseables cuando existen condiciones de flujo con un fluido con viscosidad moderada y con recortes de tamaño mediano. Por lo tanto el flujo laminar es el patrón deseable de flujo de las secciones superiores del espacio anular, desde los lastrabarreras hasta la superficie.

Se han desarrollado diferentes correlaciones para predecir la velocidad de asentamiento de los recortes durante la perforación. En cada uno de los casos, las correlaciones están basadas en mediciones de la velocidad de asentamiento obtenidas con el auxilio de simuladores experimentales y en el campo, utilizando fluidos newtonianos en condiciones estáticas y dinámicas respectivamente. Esto dio como resultado que las más apropiadas para el desarrollo de las correlaciones eran las de laboratorio en condiciones estáticas. Esto se basó en los modelos matemáticos de la Ley de Potencias y de los Plásticos de Bingham.

La aplicación de las correlaciones de la velocidad de asentamiento en las operaciones de perforación rotaria, requiere de una nueva consideración, es decir, el uso de una viscosidad aparente, que fuera representativa de las condiciones prevalecientes en el fondo del pozo. Desafortunadamente, el comportamiento de estas condiciones durante la perforación es

sumamente complejo. La geometría de los recortes es difícil de describir y varía con las características de la formación, tipo de barrena y condiciones de perforación.

Los fluidos de perforación son generalmente no-newtonianos en su naturaleza y es difícil de describir la velocidad de corte efectiva en el fluido que rodea a la partícula, las velocidades de corte resultantes del movimiento del fluido en el espacio anular y el movimiento relativo de los recortes a través del fluido, la rotación de la tubería de perforación complica aún más la situación.

Las correlaciones desarrolladas para la determinación de la velocidad de asentamiento de los recortes difieren primordialmente en la manera en que las condiciones anteriores se complican, al ser tomadas en cuenta para determinar una viscosidad aparente y una dimensión representativa de los recortes, algunas de estas condiciones son muy complejas e involucran procedimientos de ensayo y error, tal es el caso de la correlación propuesta por H. Udo Zeidler.

2.1 CORRELACION DE PRESTON L MOORE

El procedimiento propuesto por Preston L. Moore, predice la velocidad de asentamiento de la partícula mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$NRP = \frac{15.47 \rho D_p V_s}{\mu_A} \dots\dots\dots 2.1.1$$

$$f = 12852 \frac{D_p (\rho_p - \rho_f)}{V_s^2 \mu} \dots\dots\dots 2.1.2$$

Estas ecuaciones son útiles para la determinación de las

correlaciones adecuadas para cada patrón de flujo en el que se encuentre la partícula, para esto se considera que la velocidad de asentamiento depende del coeficiente de fricción, el cual a su vez depende del número de Reynolds de la partícula.

Es importante mencionar que Preston L. Moore utiliza para su correlación el diámetro de una esfera, pero si la partícula no tiene forma esférica o regular se considera un diámetro que sea equivalente al de una esfera con el mismo volumen. Moore sugirió utilizar una viscosidad aparente obtenida de la ecuación de pérdidas de presión por fricción en el modelo de la Ley de Potencias de los fluidos. Esta técnica fue propuesta por primera vez por Dodge y Metzner en 1959. De tal manera que el término de viscosidad aparente queda definido de la siguiente forma:

$$\mu_A = \frac{K'(D_{TR} - D_{TP})}{0.005 V_A} \left[\left(\frac{2.4 V_A}{D_{TR} - D_{TP}} \right) \left(\frac{2n' + 1}{3n'} \right) \right]^{n'} \quad \dots\dots\dots 2.1.3$$

Como se indica en la ecuación anterior, la velocidad anular del fluido es usada para determinar la viscosidad aparente del lodo. El efecto de resbalamiento de la partícula sobre el esfuerzo de corte del fluido no está incluido en la correlación de Preston L. Moore.

La figura 2.1.1. se utiliza para obtener el valor de Índice de Consistencia, K', en función del Índice de Comportamiento de Flujo, n', o de μ_r/v , ya sea que el fluido se rige por el modelo de la Ley de Potencias o de los Plásticos de Bingham respectivamente.

La correlación del factor de fricción presentada por Moore está mostrada en la figura 2.1.2., la cual fue obtenida mediante experimentos sobre la velocidad de asentamiento, realizados con recortes reales de lutitas y calizas en mezclas de agua y glicerina. Para números de Reynolds de la partícula mayores de 2000, el factor de fricción (f) resultante es esencialmente

PLASTICOS DE BINGHAM

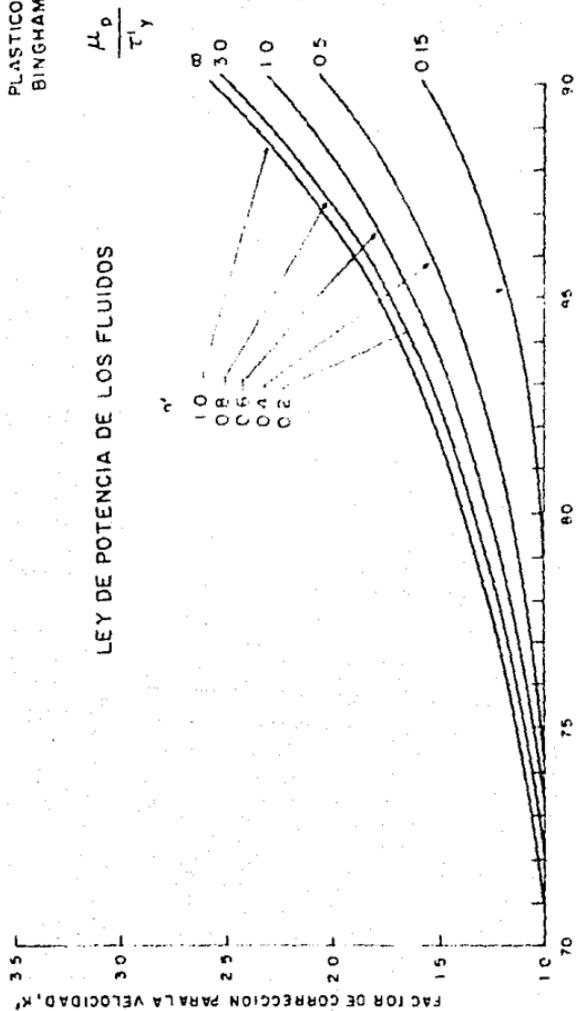


FIG. 2.1.1 OBTENCION DEL FACTOR DE CORRELACION PARA LA VELOCIDAD DEL FLUIDO EN FUNCION DE η O μ_p / τ_y .

constante con un valor aproximadamente de 1.5 en estas condiciones el patrón de flujo se supone totalmente turbulento.

La sustitución del valor de 1.5 en la ecuación 2.1.2, proporciona la siguiente ecuación que evalúa la velocidad de asentamiento de la partícula:

Si $Nr = > 2000$

$$V_s = 0.2591 \sqrt{D_p \left[\frac{p_s - p_f}{\rho_f} \right]} \quad \dots \quad 2.1.4$$

Para un número de Reynolds menor de 1.0, el patrón de flujo se considera laminar y la correlación del factor de fricción se puede obtener aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{40}{Nr} \quad \dots \quad 2.1.5$$

Al sustituir esta expresión dentro de la ecuación 2.1.2, se obtiene la siguiente ecuación para la velocidad de asentamiento de la partícula en flujo laminar.

Si $Nr \leq 1.0$

$$V_s = 4972 \frac{D_p^2}{\mu_A} (p_s - p_f) \quad \dots \quad 2.1.6$$

Como se podrá notar en la ecuación anterior aparece el término de viscosidad aparente, ya que en flujo turbulento su efecto es despreciado al compararlo con el causado por el factor de fricción.

Para condiciones de flujo en la zona de transición entre el régimen laminar y el régimen turbulento se obtuvo un dato experimental mediante la proyección de una línea recta puntuada.

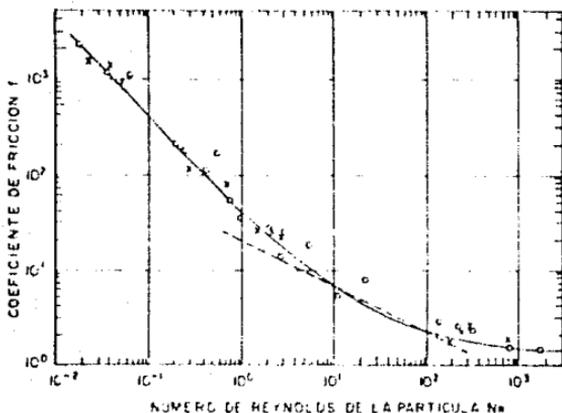


FIG. 2.1.2 GRAFICA PARA LA OBTENCION DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN A PARTIR DEL N_p .

que se muestra en la figura 2.1.2., la ecuación que describe la trayectoria es la siguiente:

$$f = \frac{22}{N_p^{0.5}} \dots \dots \dots 2.1.7$$

La velocidad de asentamiento de la partícula para un régimen de flujo transitorio puede ser calculada con la siguiente ecuación:

Si $1.0 < N_{Re} < 2000$

$$V_s = \frac{175 D_p (p_g - p_f)^{0.687}}{\rho_f^{0.888} \mu_A^{0.888}} \dots \dots \dots 2.1.8$$

Es interesante notar que esta correlación teórica de Preston L. Moore predijo que la velocidad de asentamiento de la partícula es independiente de la que experimenta el fluido en el espacio anular cuando el régimen de flujo existente es turbulento. Sin embargo, para patrones de flujo transitorio y laminar, la velocidad de asentamiento de la partícula aumenta con los incrementos que tenga la velocidad anular del fluido, tal y como lo reflejan las ecuaciones.

2.2 CORRELACION DE SZE - FOO CHIEN

Chien manifestó que aún cuando existe una gran cantidad de información disponible en la literatura sobre la velocidad de asentamiento de la partícula y también en lo que respecta a los fluidos newtonianos, solo se dispone de una limitada información sobre los fluidos no-newtonianos y el asentamiento de partículas de forma irregular. Con los resultados obtenidos del estudio de Richards quien utilizó recortes reales de cuarzo y galena, y con el auxilio de una ecuación empírica similar a la de Rubey y tomando como modelo de comportamiento del fluido, los plásticos de Bingham, Chien desarrolló la siguiente ecuación para la velocidad de asentamiento de la partícula:

$$V_s = 0.45 \left(\frac{\mu_A}{\rho_f D_p} \right) \left[\frac{\left[\frac{38800 D_p}{\mu_A} \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) + 1 \right]^{0.5}}{\left(\frac{\mu_A}{\rho_f D_p} \right)} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots 2.2.1$$

En donde se relaciona a la velocidad de asentamiento de la partícula como una función del diámetro de la misma (D_p), el cual debe de ser dinámicamente similar al de una esfera de igual volumen. El peso específico de la partícula (ρ_s), La densidad del fluido de perforación (ρ_f), y la viscosidad aparente del fluido (μ_A).

La gran mayoría de los fluidos empleados en la perforación son no-newtonianos en su naturaleza y sus propiedades viscosas no son constantes. Esto plantea el problema de seleccionar un valor de viscosidad que sea apropiado para las condiciones de operación

existentes en el pozo, obviamente, si un fluido de perforación tiene un valor de esfuerzo de cedencia elevado, como para sostener los recortes. La velocidad de asentamiento se reduciría a cero. está comprobado que la velocidad de asentamiento de los recortes decrece con algún incremento en el punto de cedencia del fluido que este presente, pero a su vez, se presenta una situación indeseable que es el incremento de las pérdidas de presión por fricción, las cuales se reflejan de manera instantánea en el sistema disminuyendo la optimización de la hidráulica del pozo.

Los resultados de los experimentos realizados por Hall Thompson-Nuss y Hopkin, demostraron que la viscosidad aparente que se tenía en el fluido, era de mayor valor que la viscosidad plástica del mismo fluido, debido a esta observación Chien decidió utilizar el término de viscosidad aparente, el cual indicó que es igual a la viscosidad plástica solo para los fluidos de perforación bentoníticos, ya que para los fluidos a base de polímeros queda definida como:

$$\mu_A = \mu_P - 300 \frac{\tau_y D_p}{V_A} \dots\dots\dots 2.2.2$$

Chien propuso que los recortes que se producen en las operaciones normales de perforación, debían ser clasificados mediante un análisis, para lograr identificar su diámetro más representativo, es decir, el más común de sus diámetros.

Tal selección requiere de algunos conocimientos del tamaño de los recortes producidos, por lo que señaló que generalmente el tamaño representativo se encuentra entre 1/8" y 5/8", para condiciones normales de operación y mayores de 3/4" para los casos donde ocurren desprendimientos de las paredes del pozo u otra condición anormal.

La ecuación empírica propuesta por Sze-Foo Chien para la velocidad de asentamiento de la partícula con fluidos de perforación y tamaño de partículas anormales es la siguiente:

$$V_s = 88.5 \sqrt{D_p \left[\frac{\rho_p - \mu}{\rho_f} \right]} \dots\dots\dots 2.2.3$$

Esta ecuación no incluye el término $\mu_A / (\rho_f D_p)$, lo que implica la eliminación de los efectos causados por la viscosidad del fluido. Esto proporciona una estimación más conservadora de la velocidad de asentamiento que la obtenida con la ecuación 2.2.1., de esta manera se convierte en una correlación más aceptable para las aplicaciones prácticas en el campo. La misma correlación corresponde a la ecuación del factor de fricción estándar para una esfera con un valor de 1.72 y sustituido en (i) de la fórmula 2.1.2., cuyo valor es ligeramente mayor que el de 1.5 recomendado por Preston L. Moore, para usarse en regímenes de flujo turbulento. El uso de la ecuación 2.2.1., se reserva solo a los casos donde las propiedades viscosas del fluido de perforación son normalmente altas, lo cual se determina si $\mu_A / (\rho_f D_p) > 10$, o bien cuando se requiere una estimación más precisa de la velocidad de asentamiento de la partícula.

La comparación de estas ecuaciones y la de Rubey, esta mostrada en la figura 2.2.1., en donde se utilizaron los datos de los experimentos de Richards. Hopkin trabajó con recortes planos y redondos, y por último los datos de Oedjoe y Buchanan.

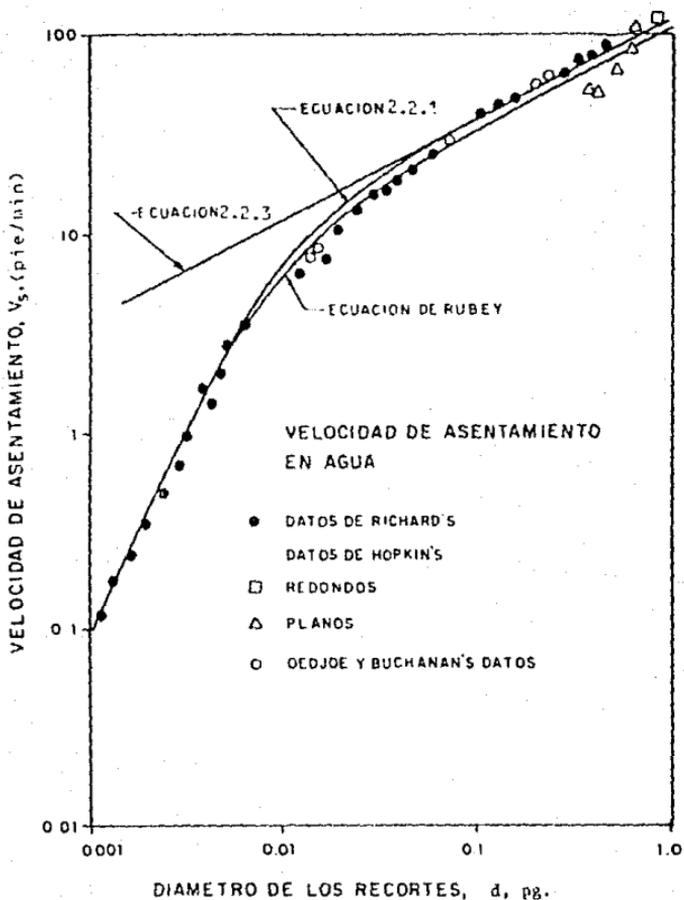


FIG. 2.2.1 COMPARACION ENTRE DATOS EXPERIMENTALES Y VARIAS ECUACIONES PARA LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO DE LOS RECORTES DE PERFORACION.

2.3 CORRELACION DE WALKER Y MAYES

El procedimiento empleado por R.E. Walker y T.N. Mayes, para el desarrollo de un método útil, cuyo objetivo es la predicción de la velocidad de asentamiento de la partícula, se basó asumiendo un conjunto de datos, condiciones y ecuaciones necesarias para efectuar el análisis, que más tarde dió como resultado una serie de ecuaciones empíricas aplicadas al cálculo de la predicción de la velocidad de asentamiento. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en los experimentos y con los trabajos de otros investigadores.

Walker y Mayes aplicaron mediciones de la velocidad de asentamiento de la partícula en una columna de fluido estático a base de polímeros, asumiendo que la partícula tiene forma de disco para evitar el problema que representa la forma irregular de los recortes en lo que respecta a la selección de sus dimensiones más representativas, volumen, área, etc., y con la suposición de que el disco cae con su cara plana hacia abajo, esto en realidad solo se presenta en condiciones de alta velocidad de asentamiento, se logra establecer el coeficiente de arrastre para la forma y orientación C_D , así como la relación que este tenga con el número de Reynolds para cada régimen de flujo. Además se estableció otra condición para el término de viscosidad aparente utilizada en la determinación del número de Reynolds, definida por la siguiente ecuación:

$$\mu_A = 311 \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \dots\dots\dots 2.3.1$$

De esta forma la viscosidad aparente se encuentra en función de dos importantes propiedades del fluido de perforación que son el esfuerzo de corte (τ_0), y la velocidad de corte ($\dot{\gamma}$).

Como anteriormente se había mencionado, las correlaciones de la velocidad de asentamiento de la partícula están desarrolladas

para una determinada relación entre el coeficiente de arrastre C_D , y el número de Reynolds para cada uno de los regímenes de flujo existentes, así como para cada condición particular presentada en alguna de las operaciones de perforación.

El coeficiente de arrastre para el caso de un disco que cae con su cara plana hacia abajo, es decir, con su máxima área en posición horizontal es:

$$C_D = \frac{2 g H (\rho_o - \rho_l)}{V_o^2 \rho_l} \dots\dots\dots 2.3.2$$

El número de Reynolds para la partícula donde el término de viscosidad se refiere en realidad a la viscosidad aparente del líquido alrededor de un disco, está definido como:

$$N_R = \frac{D_o V_o \rho_l}{\mu_A} \dots\dots\dots 2.3.3$$

Si sustituimos la ecuación 2.3.1, en la ecuación 2.3.3, obtendremos la ecuación del número de Reynolds en función de la relación de la velocidad de corte y el esfuerzo de corte como se muestra en la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{D_o V_o \rho_l \bar{\gamma}}{\tau_o} \dots\dots\dots 2.3.4$$

Las ecuaciones que relacionan a el coeficiente de arrastre y al número de Reynolds, para cada régimen de flujo son las siguientes:

Para flujo turbulento

Si $N_R = > 100$
 $C_D = 1.12 \dots\dots\dots 2.3.5$

Para flujo transitorio

Si $1.0 < N_{Re} < 100$

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}^{2/3}} \dots\dots\dots 2.3.6$$

Para flujo laminar

Si $N_{Re} < 1.0$

$$C_D = \frac{24}{N_{Re}} \dots\dots\dots 2.3.7$$

Es necesario hacer notar que las ecuaciones anteriores para los regimenes de Flujo laminar y turbulento son consistentes con los datos reportados en la literatura para los fluidos newtonianos, lo cual de inmediato plantea un posible error en su aplicación a los fluidos utilizados en las operaciones de perforación, que en la gran mayoría son no-newtonianos. Para el caso de la correlación de flujo transitorio, si se desea una mayor exactitud, se hace indispensable el uso de una ecuación más compleja, lo que no sería muy adecuado en cuanto a su aplicación práctica en el campo, de tal manera que la simplicidad de la ecuación 2.3.7., justifica su uso, aún cuando esta última proporciona un ajuste deficiente específicamente en el rango de 15 a 40 del número de Reynolds.

La intersección de la ecuación de flujo transitorio con las de flujo laminar y turbulento, con un $N_{Re} = 1.0$ y $N_{Re} = 100$ respectivamente, proporciona una conclusión razonable de los datos de la literatura para fluidos newtonianos.

La ecuación de la velocidad de asentamiento de las partículas para el régimen de flujo turbulento, se obtienen si consideramos que:

$$C_D = \frac{H}{V_s^2} \left[\frac{v_s - H}{H} \right] \dots\dots\dots 2.3.8$$

Cd es el coeficiente de arrastre para un disco que cae con su cara plana en posición horizontal, si consideramos que Cd para flujo turbulento es igual a 1.12, se sustituye este valor y desarrollando la ecuación anterior para manejar en el campo unidades de campo consistentes y resolviendo Vs, la ecuación adquiere la siguiente forma:

$$V_s = 131.4 \sqrt{\frac{H (\rho_o - \rho_f)}{\rho_f}} \dots\dots\dots 2.3.9$$

Walker y Mayes desarrollaron una ecuación al reemplazar, el término de viscosidad aparente en el número de Reynolds, por una relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad del corte, posteriormente se definieron para cada una de las condiciones existentes en las operaciones de perforación rotaria, ensayaron varias correlaciones, pero la que proporciona el mayor ajuste para los resultados experimentales que realizaron, esta definida de la siguiente manera:

$$\tau_o = \sqrt{\frac{100 Fr H (\rho_o - \rho_f) g}{g_o}} \dots\dots\dots 2.3.10$$

En donde fue necesario insertar un factor que permite dimensionar las unidades, este factor es (Fr), cuyo valor unitario es 1 lb/100 pies², de tal manera que para unidades consistentes de campo, (τo) queda definida de la siguiente manera:

$$\tau_o = 7.9 \sqrt{H (\rho_o - \rho_f)} \dots\dots\dots 2.3.11$$

En la expresión anterior (τ_0) tiene las siguientes unidades $\text{lb}/100 \text{ pies}^2$.

Walker y Mayes establecieron la siguiente correlación para los regímenes de flujo laminar y de transición con unidades consistentes:

$$1.218 \tau_0 \sqrt{\frac{D_0 \bar{\gamma}}{\rho}} \dots\dots\dots 2.3.12$$

En esta correlación, el término de viscosidad aparente usado para determinar el patrón de flujo, está basado en la velocidad de corte relativa, ($\bar{\gamma}$), que está en función del desplazamiento de la partícula. Como puede notarse, esta correlación no toma en cuenta el efecto de la velocidad angular del fluido sobre la velocidad de corte experimentada por las partículas del fluido más próximas a la superficie del corte. Así, la correlación para la predicción de la velocidad de asentamiento de los recortes es independiente de la velocidad angular existente en el agujero.

2.4 CORRELACION DE H. UDO ZEIDLER

Zeidler tomo como base de sus análisis el modelo de la Ley de Potencias, ya que consideró que este modelo describe el comportamiento de los fluidos de perforación con mejor exactitud y en un rango mayor de la velocidad de corte del fluido. Matemáticamente este modelo se define en la siguiente forma:

$$\tau = K \gamma^N \quad \dots \quad 2.4.1$$

Donde:

- τ es el esfuerzo de corte.
- γ es la velocidad de corte
- K es el Índice de consistencia, que puede ser descrito como un término de la viscosidad
- N es el exponente de la Ley de Potencias e indica el grado de comportamiento no - newtoniano que un fluido presenta sobre un rango prescrito de la velocidad de corte.

La viscosidad correspondiente al esfuerzo de corte de un fluido puede ser usada para determinar una viscosidad aparente relativa, de tal manera que el método de cálculo se vuelve menos complejo y más preciso para determinar la distribución de la velocidad de circulación en el espacio anular del pozo.

Para fluidos no-Newtonianos, Zeidler definió a la viscosidad aparente como: La viscosidad a la cual el fluido deberá tener la misma velocidad de asentamiento de la partícula, al caer esta en un fluido no-newtoniano de la misma densidad. La relación matemática que define a la viscosidad aparente tiene la siguiente forma:

$$\mu_A = K \left[f(N) \left[\frac{D_{DE}}{D_I} \right]^{E(N)} \left[\frac{V_o}{D_{DE}} \right]^{(N-1)} \right] \quad \dots \quad 2.4.2$$

Donde: $f(N)$ y $E(N)$ son funciones dependientes del exponente

de la Ley de Potencias, y que fueron determinadas mediante el análisis de resultados de los datos experimentales, matemáticamente Zeidler las definió como:

$$f(N) = (1 - N)/2 \quad \dots\dots\dots 2.4.3$$

y

$$f(N) = (N + 5) (1.1 - 0.06 \sqrt{1 - N^2}) \quad \dots\dots 2.4.4$$

La velocidad de corte equivalente, representa la velocidad de corte definida en la curva reológica de los fluidos, a la que se produce una viscosidad igual a la aparente, (μ_A), y esta definida como:

$$\gamma_{eq} = \frac{F_y V_0}{D_{ox}} \quad \dots\dots\dots 2.4.5$$

Donde: (F_y) es el coeficiente de la velocidad de corte equivalente, que se define con la siguiente expresión:

$$F_y = f(N) \left[\frac{D_{ox}}{D_i} \right]^{(N-1)} \quad \dots\dots\dots 2.4.6$$

Si sustituimos la ecuación 2.4.6 en la ecuación 2.4.5, obtendremos:

$$\mu_A = K \left[\frac{F_y V_0}{D_{ox}} \right]^{(N-1)} \quad \dots\dots\dots 2.4.7$$

Ahora bien, la ecuación del Número de Reynolds está descrita por la siguiente ecuación:

$$N_{R} = \frac{\rho l V_0 D}{\mu} \dots\dots\dots 2.4.8$$

Si se supone que $\mu = \mu_A$, se sustituye μ_A por la ecuación 2.4.8., en la ecuación 2.4.7., y se obtiene:

$$N_{R} = \frac{\rho l V_0^{(2-N)} D D E}{K F \gamma^{(N-1)}} \dots\dots\dots 2.4.9$$

Zeidler estableció la necesidad de una caracterización geométrica de los recortes, útil para el cálculo de sus dimensiones y velocidad de asentamiento en el seno del fluido, logrando de esta manera una mejor comprensión del mecanismo de transporte de los mismos.

La caracterización consiste en la clasificación de los recortes de acuerdo a sus tres dimensiones más significativas, D_j , D_k , y D_l . Teniendo cuidado con la geometría, se puede determinar los coeficientes del volumen y del área proyectada, α_v y α_A , respectivamente. Las ecuaciones que definen estos coeficientes son:

$$\alpha_v = V / \left(\frac{\pi}{4} D_j D_k D_l \right) \dots\dots\dots 2.4.10$$

y

$$\alpha_A = A / \left(\frac{\pi}{4} D_j D_k \right) \dots\dots\dots 2.4.11$$

Donde: (V) es el volumen de la partícula de masa y de densidad conocida, y (A) es el área proyectada por la cara plana de la partícula, en función de las dimensiones (D_j) y (D_k).

El coeficiente de arrastre resulta de la resistencia al

flujo, ejercida por el área proyectada de la partícula mientras esta cae en el seno del fluido. Zeidler desarrolló la siguiente ecuación para definirlo:

$$C_D = \frac{4g (\rho_o - \rho_f) D_p}{3 \rho_f V_B^2} \left[\frac{\alpha^3}{\cos \phi f(\phi)} \right] \dots\dots 2.4.12$$

Donde: (D_p) es el diámetro inclinado a un ángulo (ϕ) de la vertical y $f(\phi)$ es el factor de corrección para el área proyectada, en función del ángulo de inclinación del plano de caída.

Suponiendo que la partícula cae con su cara plana en posición horizontal, $\phi = 0^\circ$, como la función del factor de corrección para el área proyectada es $f(\phi) = \cos \phi$, entonces toma el valor de $f(\phi) = 1$.

Con el uso de datos obtenidos en sus experimentos de laboratorio Zeidler desarrolló el siguiente conjunto de ecuaciones que sirven para el cálculo del coeficiente de arrastre de la partícula en función del valor del número de Reynolds.

Si $N_R < 1$

$$C_D = \frac{28.2}{N_R} \dots\dots\dots 2.4.13$$

Si $1 < N_R < 10$

$$C_D = \frac{24}{N_R} (1 + 0.178 N_R^{0.04}) \dots\dots 2.4.14$$

Si $10 < N_R < 800$

$$C_D = \frac{31.5}{N_R} (1 + 0.03098 N_R^{1.045}) \dots\dots 2.4.15$$

Si $Na > 800$

$$C_D = 1.337 \dots \dots \dots 2.4.16$$

Ahora bien, si la ecuación 2.4.12 se resuelve para V_s se obtendrá:

$$V_s = \left[\frac{4g (p_s - p_l) D_i}{3 p_l C_D} \left(\frac{\alpha_v}{\alpha_A f(\phi_i)} \right) \right]^{1/2} \quad 2.4.17$$

Si se considera que para fines prácticos:

$$\alpha_v = 0.78, \alpha_A = 0.922 \text{ y } f(\phi_i) = 1$$

La ecuación 2.4.17., para usar unidades de campo queda definida de la siguiente manera:

$$V_s = 104.34 \left[\frac{(p_s - p_l) D_i}{p_l C_D} \right]^{1/2} \dots \dots \dots 2.4.18$$

La ecuación 2.4.9 que define el número de Reynolds para unidades de campo adquiere la siguiente forma:

$$Na = \frac{8.337 p_l}{K F y^{N-1}} \left(\frac{V_s}{0.5047} \right)^{2-N} \left(\frac{D_{oz}}{30.28} \right)^N \dots \dots \dots 2.4.19$$

El método de cálculo de Zeidler propuesto es un método iterativo, el cual será definido más adelante.

PROGRAMAS DE COMPUTO
EVALUACION Y COMPARACION DE LAS CORRELACIONES

Aquí se muestran los procedimientos de cálculo en forma detallada, los tipos de métodos ya sean simples o iterativos, las variables y unidades que emplean cada una de las correlaciones, y como apoyo se ofrecerán diagramas de flujo y algunos ejemplos del desarrollo de cálculo para cada método.

Otro aspecto que se presentará en este capítulo, está relacionado con el análisis de los resultados obtenidos con los programas de cómputo, así, como el grado de precisión obtenido en la predicción de la velocidad de asentamiento de los recortes en cada uno de los modelos.

ALGORITMOS DE CALCULO, DIAGRAMAS DE FLUJO Y EJEMPLOS DE LAS
CORRELACIONES.

ALGORITMO DE CALCULO PARA LA CORRELACION DE SZE FOO CHIEN

El desarrollo matemático de esta correlación es en la práctica muy simple, este modelo hace uso únicamente de la viscosidad plástica (VIP), y dentro de los parámetros requeridos también es el único en emplear una clasificación química de los fluidos utilizados; si son a base de polímeros una P, y si son del tipo bentónico una B, esto es importante para obtener la viscosidad aparente MUA (μ_A).

Para la determinación de la velocidad de asentamiento de la partícula, este modelo cuenta con dos ecuaciones para el cálculo, las que se utilizan de acuerdo al valor que adquiere la relación matemática (COND), la cual está definida en función de la viscosidad aparente, la densidad del fluido y el diámetro de la partícula que sea más representativo de la misma o en su defecto

el diámetro equivalente a una esfera con el mismo volumen.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

El primer paso es determinar la viscosidad aparente del fluido MUA (μ_A), para lograrlo se requiere de antemano conocer el tipo de fluido empleado.

Si el lodo es bentonítico, la viscosidad aparente será igual a la viscosidad plástica (VIP), la cual es de fácil obtención mediante el uso del viscosímetro Fann, entonces:

Si el lodo es bentonítico:

$$\mu_A = VIP$$

De lo contrario si el lodo empleado es a base de polímeros, la viscosidad aparente se definirá de la siguiente forma:

$$\mu_A = VIP + 300 \frac{T_y D_o}{V_A}$$

El siguiente paso es definir cual de las dos ecuaciones para el cálculo de la velocidad de asentamiento de la partícula en este método deberá utilizarse, esto se logra mediante el cálculo del factor COND que se obtendrá con el uso de la siguiente ecuación:

$$COND = \frac{\mu_A}{D_o \rho_f}$$

Ahora bien, si $COND > 10$, la ecuación que define el valor de la velocidad de asentamiento es:

$$V_{sc} = 0.45 \left(\frac{\mu_A}{\rho_f D_o} \right) \left[\left[\left(\frac{36800}{\left(\frac{\mu_A}{\rho_f D_o} \right)^2} \right) \left(\frac{\rho_o - \rho_f}{\rho_f} \right) + 1 \right]^{0.5} - 1 \right]$$

De lo contrario, si $COND = < 10$, la ecuación que debe utilizarse es:

$$V_{sc} = 88.5 \sqrt{D_s \left[\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_f} \right]} \dots\dots\dots 2.2.3$$

Las variables empleadas son:

- μ_A : Viscosidad aparente del fluido [cp].
- VIP : Viscosidad plástica del fluido [cp].
- T_y : Esfuerzo de cedencia del fluido [lb/100 pie²].
- D_s : Diámetro de la partícula [pg].
- ρ_p : Densidad de la partícula [lb/gal].
- ρ_f : Densidad del fluido [lb/gal].
- V_A : Velocidad anular del fluido [pie/min].
- V_{sc} : Velocidad de asentamiento de la partícula [pie/min].

EJEMPLOS

NUMERO 1. -

En este caso se utiliza la fórmula más compleja.

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO	$\rho_f = 8.33$ [lb/gal]
DENSIDAD DE LA PARTICULA	$\rho_p = 22.34$ [lb/gal]
TIPO DE FLUIDO	POLIMERO P
VISCOSIDAD PLASTICA	VIP = 10.40 [cp]
ESFUERZO DE CEDENCIA	$T_y = 22.33$ [lb/100 pie ²]
DIAMETRO DE LA PARTICULA	$D_s = 0.250$ [pg]
VELOCIDAD ANULAR	$V_A = 100$ [pie/min]

SOLUCION

TIPO DE LODO: BASE POLIMERO

$$\begin{aligned} \text{MUA} &= \text{VIP} + 300 \frac{\text{Ty Ds}}{\text{VA}} \\ &= 10.4 + 300 \frac{22.33 \times 0.29}{100} \end{aligned}$$

$$\text{MUA} = 27.1475 \text{ (cp)}$$

$$\begin{aligned} \text{COND} &= \frac{\text{MUA}}{\text{Ds } \rho l} \\ &= \frac{27.1475}{0.29 \times 8.33} \\ &= 13.0361 \end{aligned}$$

COMO:

COND > 10 ENTONCES:

$$V_{sc} = 0.45 \left(\frac{\text{MUA}}{\rho l \text{ Ds}} \right) \left[\left[\frac{36800 \text{ Ds}}{\left(\frac{\text{MUA}}{\rho l \text{ Ds}} \right)^2} \left(\frac{\rho l - \rho_s}{\rho l} \right) + 1 \right]^{0.5} - 1 \right]$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{sc} = 50.42 \text{ pie/min}$$

2. - En este caso se utiliza la segunda fórmula, la cual es más simple.

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO	$\rho_f = 8.33$ [lb/gal]
DENSIDAD DE LA PARTICULA	$\rho_p = 23.89$ [lb/gal]
TIPO DE FLUIDO	POLIMERO P
VISCOSIDAD PLASTICA	VIP = 8.30 [cp]
ESFUERZO DE CEDENCIA	$T_y = 18.30$ [lb/100 pie ²]
DIAMETRO DE LA PARTICULA	$D_p = 1.000$ [pg]
VELOCIDAD ANULAR	$V_A = 100$ [pie/min]

SOLUCION

TIPO DE LODO: BASE POLIMERO

$$MUA = VIP + 300 \frac{T_y D_p}{V_A}$$

$$= 8.3 + 300 \frac{18.30 * 1}{100}$$

$$MUA = 61.2 \text{ [cp]}$$

$$COND = \frac{MUA}{D_p \rho_f}$$

$$= \frac{61.2}{1.00 * 8.33}$$

$$COND = 7.3489$$

como:

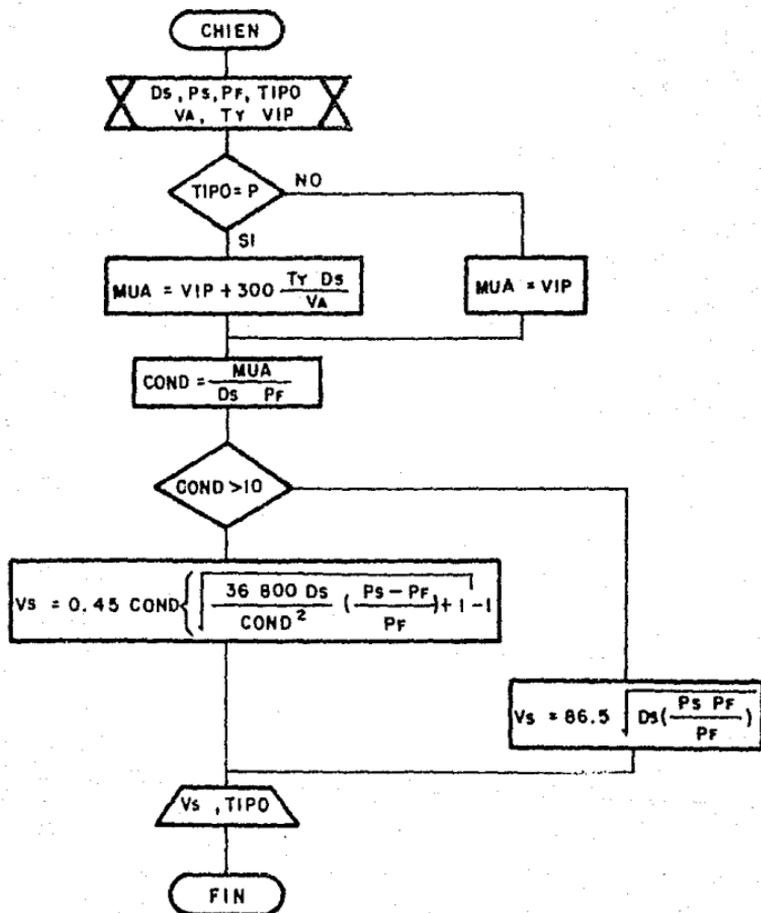
COND < 10, entonces:

$$V_{sc} = 88.5 \sqrt{D_s \left[\frac{\rho_e - \rho_l}{\rho_l} \right]}$$

Substituyendo valores se obtiene:

$$V_{sc} = 117.0788 \text{ (pie/min)}$$

DIAGRAMA DE FLUJO
 MODELO DE SZE - FOO CHIEN



```

REM PROGRAMA PARA EL MODELO DE SIZE-POSS CHINA
REM
REM
REM INFORMACION DEL MODELO
COLSE 15, 1
CLS
PLAY "FD"
PRINT "
                INFORMACION REQUERIDA"
PRINT "
                PARA EL MODELO DE SIZE-POSS CHINA "
PRINT
INPUT "DIAMETRO DE LA PARTICULA (mm): ", DS
INPUT "DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal):", RGS
INPUT "DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal):", ROF
INPUT "VISCOSIDAD PLASTICA (cp): ", VIP
INPUT "VELOCIDAD ANGULAR (pie/min): ", VA
INPUT "ESFUERZO DE COHESION (lb/100 pie2):", TT
23 INPUT "ES FLUIDO BENTONITICO ? ", POLS
IF POLS <> "SI" AND POLS <> "NO" THEN GOTO 23
IF POLS <> "NO" THEN
MOA = VIP + (300 * TT + DS / VA)
ELSE
MOA = VIP
END IF
COND = MOA / (DS * ROF)
IF COND > 10 THEN
PLAY "FD"
VSC = 45 * COND * (SQRT(136000 * DS / (COND * 2)) * ((ROS - ROF) / ROF) + 1) - 11
ELSE
BEEP
VSC = 86.5 * SQRT(DS * ((ROS - ROF) / ROF))
END IF
PRINT
PRINT "
                RESULTADOS OBTENIDOS"
PRINT
PRINT
PRINT "VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min):", VSC
END

```

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE SZE-FOO CHIEN

DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg): .25
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal):22.74
DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal):8.33
VISCOSIDAD PLASTICA (cp): 10.49
VELOCIDAD ANULAR (pie/min): 100
ESFUERZO DE COHESION (lb/100 pie²):20.33
ES FLUIDO BENTONITICO ? :NO

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min): 50.4148

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE SZE-FOO CHIEN

DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg): 1
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal):23.57
DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal):8.33
VISCOSIDAD PLASTICA (cp): 6.30
VELOCIDAD ANULAR (pie/min): 100
ESFUERZO DE COHESION (lb/100 pie²):18.30
ES FLUIDO BENTONITICO ? :NO

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min): 117.0766

ALGORITMO DE CALCULO PARA LA CORRELACION DE PRESTON L. MOORE

El procedimiento de cálculo empleado en este modelo es de tipo iterativo, en donde una característica singular para la obtención de la viscosidad aparente del fluido involucra el uso de las dimensiones del espacio anular, es decir, el diámetro de la tubería de revestimiento o de las paredes del pozo, DTR, y el diámetro de la tubería de perforación, DTP, la ecuación que define este parámetro se muestra a continuación, pero antes se requiere proporcionar un valor velocidad anular proporcionada como dato.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Como primer paso se igualan las velocidades:

$$V_{ss} = V_A$$

Luego:

$$MUA = \frac{K' (D_{TR} - D_{TP})}{0.008 V_{ss}} \left[\left(\frac{2.4 V_A}{D_{TR} - D_{TP}} \right) \left(\frac{2n' + 1}{3n'} \right) \right]^n$$

A continuación se requiere el cálculo del Número de Reynolds de la partícula, N_R , como se muestra a continuación:

$$N_R = \frac{19.47 \rho_f D_p V_A}{MUA}$$

El siguiente paso es seleccionar la ecuación para la velocidad de asentamiento, existen 3 operaciones y su uso esta en función del rango del Número de Reynolds:

Si $N_R < = 2000$

Entonces:

$$V_s = 92.591 \sqrt{D_s \left(\frac{p_a - p_t}{p_t} \right)}$$

Si $1.0 < N_R < 2000$

Entonces:

$$V_s = \frac{173 D_s (p_a - p_t)^{0.007}}{p_t^{0.003} MUA^{0.003}}$$

Y si $N_R < = 1.0$

Entonces:

$$V_s = 4672 \frac{D_s^2}{MUA} (p_a - p_t)$$

A continuación se deberá comprobar el factor de diferencia o aproximación entre la velocidad supuesta y la calculada, FAC, con el fin de controlar el ciclo en el programa, puesto que este es un método iterativo. Esto se logra de la siguiente manera:

$$FAC = \left| \frac{V_{ss} - V_{sc}}{V_{ss}} \right|$$

Ahora bien, si $FAC = > 0.5$, se concluye el cálculo, de lo contrario se tendrá que sustituir el valor de la velocidad calculada por el de la supuesta y continuar de nuevo otro cálculo, hasta que la condición de FAC se cumpla.

EJEMPLO

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO	$\rho_f = 8.33$ [lb/gal]
DENSIDAD DE LA PARTICULA	$\rho_p = 23.50$ [lb/gal]
DIAMETRO DE LA PARTICULA	$D_p = 1.00$ [pg]
DIAMETRO DEL AGUJERO O T. R.	$D_{ra} = 8.70$ [pg]
DIAMETRO DE LA T. P. (TUBERIA DE PERFORACION)	$D_{rp} = 4.50$ [pg]
INDICE DE CONSISTENCIA	$K = 0.20$ [lb-seg ^N /100 pie ²]
INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS	$N = 0.737$
VELOCIDAD ANULAR	$V_A = 100$ [pie/min]

SOLUCION

PRIMER CICLO

$$V_{ss} = V_A = 100 \text{ [pie/min]}$$

$$NUA = \frac{K (D_{ra} - D_{rp})}{0.005 V_{ss}} \left[\left(\frac{2.4 V_{ss}}{D_{ra} - D_{rp}} \right) \left(\frac{2N + 1}{3N} \right) \right]^N$$

$$NUA = \frac{0.2(8.7-4.5)}{0.005 V_{ss}} \left[\left(\frac{2.4 V_{ss}}{8.7 - 4.5} \right) \left(\frac{(2 * 0.737) + 1}{3 * 0.737} \right) \right]^{0.737}$$

$$NUA = \left(\frac{100}{V_{ss}} \right) (0.8304 * V_{ss})^{0.737}$$

Sustituyendo el valor de $V_{ss} = 100$ [pie/min]

$$MUA = 33.9885 \text{ [cp]}$$

A continuación se tiene:

$$\begin{aligned} N_n &= \frac{15.47 \text{ pt } D_s \text{ De } V_{ss}}{MUA} \\ &= \frac{15.47 * 23.59 * 1 * V_{ss}}{MUA} \\ &= \frac{364.9373 * V_{ss}}{MUA} = 364.9373 * (V_{ss}/MUA) \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de $V_{ss} = 100$ [pie/min] y $MUA = 33.9885$ [cp] se obtiene:

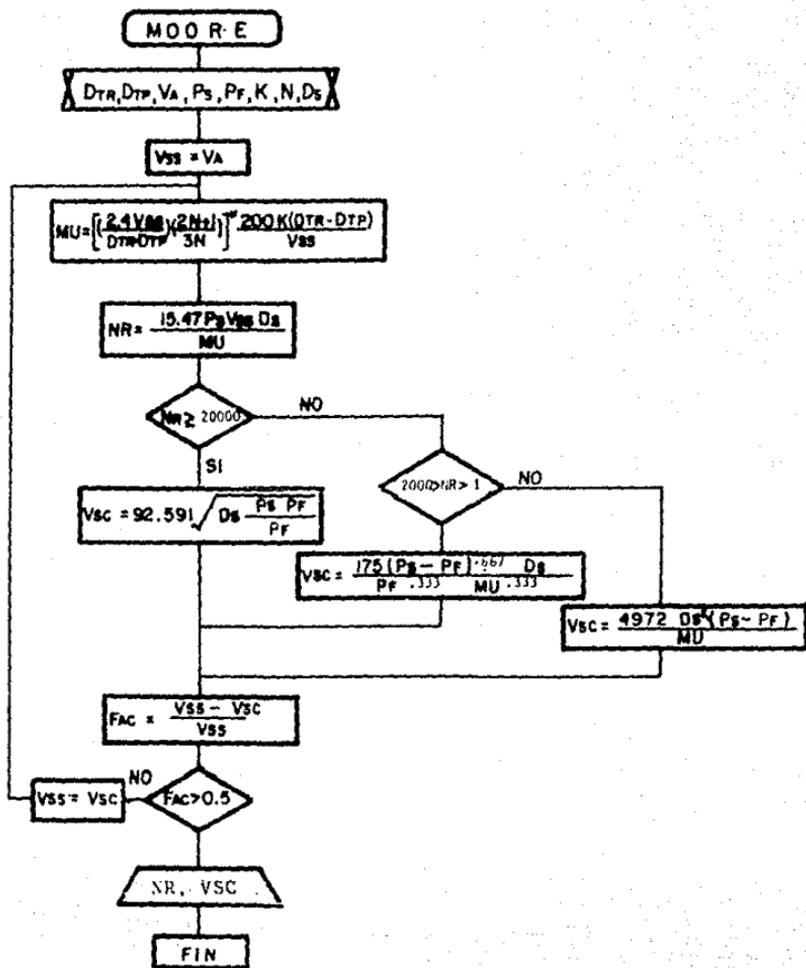
$N_n = 1014$ como $2000 > N_n > 1$ se utiliza la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} V_{sc} &= \frac{175 \text{ D}_s (p_s - p_t)^{0.007}}{p_t^{0.233} * MUA^{0.233}} \\ &= \frac{175 * 1 * (23.59 - 8.33)^{0.007}}{8.33^{0.233} * MUA^{0.233}} \\ &= 531.97857 / MUA^{0.233} \\ &= 531.97857 / 33.9885^{0.233} \end{aligned}$$

$$V_{sc_1} = 181.3212 \text{ [pie/min]}$$

Como se podrá notar en este ciclo se cumple que FAC es mayor a 0.5.

DIAGRAMA DE FLUJO
 MODELO DE PRESTON L. MOORE



```

REM PROGRAMA PARA CALCULAR LA VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO CON
REM EL MODELO DE PRESTON L. MOORE
REM INFORMACION DEL MODELO
REM
COLOR 15, 1
CLS
PLAY "FD"
PRINT "
                INFORMACION REQUERIDA"
PRINT "
                PARA EL MODELO DE PRESTON L. MOORE"
PRINT
INPUT "DIAMETRO DEL AGUJERO O TR (pg) :", DTR
INPUT "DIAMETRO DE LA TUBERIA DE PERFORACION (pg):", DTP
INPUT "DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg):", DS
INPUT "VELOCIDAD ANGULAR (pie/min):", VA
INPUT "DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal):", ROF
INPUT "DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal):", ROS
INPUT "INDICE DE CONSISTENCIA (lb/seg^n/100 pie^2):", K
INPUT "INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim):", N
REM
VSS = VA
10 MU1 = ((2.4 * VSS / (DTR - DTP)) * ((2 * N + 1) / (3 * N))) ^ N
MU2 = (200 * K * (DTR - DTP)) / VSS
MU = MU1 * MU2
NR = 15.47 * ROS * VSS * DS / MU
IF NR >= 2000 THEN
VSC = 92.591 * SOB/DS * ((ROS - ROF) / ROF)
ELSE
IF NR < 2000 AND NR > 1 THEN
VSC = 175 * DS * ((ROS - ROF) ^ .667) / ((ROF ^ .333) * (MU ^ .333))
ELSE
VSC = 4972 * (DS ^ 2) * (ROS - ROF) / MU
END IF
END IF
FAC = ABS((VSS - VSC) / VSS)
IF FAC < .5 THEN
VSS = VSC
GOTO 10
END IF
PRINT
PRINT "                RESULTADOS OBTENIDOS                "
PRINT
PRINT "NUMERO DE REYNOLDS (adim)                                ", NR
PRINT "FACTOR DE COMPARACION DE LAS VELOCIDADES ", FAC
PRINT "VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min)          ", VSC
END

```

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE PRESTON L. MOORE

DIAMETRO DEL AGUJERO O TR (pg) :8.7
DIAMETRO DE LA TUBERIA DE PERFORACION (pg):4.5
DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg):1
VELOCIDAD ANULAR (pie/min):100
DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal):8.33
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal):23.59
INDICE DE CONSISTENCIA (lb/segⁿ/100 pie²):.2
INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim):.737

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

NUMERO DE REYNOLDS (adim)	1014.038
FACTOR DE COMPARACION DE LAS VELOCIDADES	.6132124
VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min)	161.3212

ALGORITMO DE CALCULO PARA LA CORRELACION DE R. E. WALKER
Y T. N. MAYES

Esta correlación hace uso de la viscosidad aparente, μ_A (CMUA), solo que esta se encuentra en función del esfuerzo de corte, τ_s y la velocidad de corte, $\bar{\gamma}$.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Como primer paso se determina el esfuerzo de corte del fluido de perforación, τ_s , con el uso de la siguiente ecuación:

$$\tau_s = 7.9 \sqrt{H (\rho_s - \rho_f)}$$

A continuación se calcula la velocidad de corte del fluido en función del esfuerzo de corte, τ_s . El índice de consistencia, K , y el índice de comportamiento de flujo N , lo cual se logra de la siguiente manera:

$$\bar{\gamma} = \left(\frac{\tau_s}{K} \right)^{1/N}$$

El siguiente paso es el cálculo de la viscosidad aparente, μ_A (CMUA), que existe para estas condiciones:

$$\mu_A = 511 \frac{\tau_s}{\bar{\gamma}}$$

Posteriormente se debe determinar el número de Reynolds de la partícula, Re_p , de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{15.47 \rho_f D_s V_A}{\mu_A}$$

Ahora bien, si el número de Reynolds es menor de 100 se usa la siguiente ecuación para la determinación de la velocidad de asentamiento:

Si $N_R < 100$

$$V_{sc} = 1.218 \tau_e \sqrt{\frac{D_s \bar{\gamma}}{\rho_f}}$$

O bien:

Si $N_R \geq 100$

$$V_{sc} = 131.4 \sqrt{\frac{H (\rho_p - \rho_f)}{\rho_f}}$$

Las variables empleadas son:

- μ_A : Viscosidad aparente del fluido [cp].
- $\bar{\gamma}$: Velocidad de corte del fluido [seg^{-1}].
- τ_e : Esfuerzo de corte del fluido [$\text{lb}/100 \text{ pie}^2$].
- K : Índice de consistencia [$\text{lb}\cdot\text{seg}^N/100 \text{ pie}^2$].
- N : Índice de comportamiento de la ley de potencias [adm].
- D_s : Diámetro de la partícula [pg].
- H_s : Espesor de la partícula [pg].
- ρ_p : Densidad de la partícula [lb/gal].
- ρ_f : Densidad del fluido [lb/gal].
- V_A : Velocidad anular del fluido [pie/min].
- V_{sc} : Velocidad de asentamiento de la partícula [pie/min].

EJEMPLO

NUMERO 1.- Caso para flujo laminar y transicional $N_{\mu} < 100$

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO

$$\rho_f = 8.33 \text{ [lb/gal].}$$

DENSIDAD DE LA PARTICULA

$$\rho_p = 23.59 \text{ [lb/gal].}$$

DIAMETRO DE LA PARTICULA

$$D_s = 1.00 \text{ [pg].}$$

ESPOSOR DE LA PARTICULA

$$H = 0.031 \text{ [pg].}$$

INDICE DE CONSISTENCIA

$$K = 3.20 \text{ [lb-sec}^N \text{/100 pie}^2 \text{].}$$

INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS

$$N = 0.327 \text{ [adm].}$$

VELOCIDAD ANULAR

$$V_A = 100 \text{ [pie/min].}$$

SOLUCION

$$\begin{aligned} \tau_0 &= 7.9 \sqrt{H (\rho_p - \rho_f)} \\ &= 7.9 \sqrt{0.031 * (23.59 - 8.33)} \end{aligned}$$

$$\tau_0 = 5.43357 \text{ [lb/100 pie}^2 \text{]}$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= \left(\frac{\tau_0}{K} \right)^{1/N} \\ &= (5.43357 / 3.2)^{1/0.327} \end{aligned}$$

$$\bar{\gamma} = 5.04854 \text{ [seg}^{-1} \text{]}$$

$$\begin{aligned} \mu_A &= 511 \frac{\tau_0}{\bar{\gamma}} \\ &= 511 * (5.43357 / 5.04854) \end{aligned}$$

$$\mu_A = 549.97160 \text{ [cp].}$$

$$N_R = \frac{15.47 \rho_f D_s V_{ss}}{\mu_A}$$

$$= 15.47 \left(\frac{8.33 \times 1 \times 100}{540.07169} \right)$$

$$N_R = 23.43122$$

como $N_R < 100$ se usa la siguiente ecuación:

$$V_{sc} = 1.218 \tau_e \sqrt{\frac{D_s \bar{\gamma}}{\sqrt{\rho_f}}}$$

$$= 1.218 \times 5.43357 \sqrt{\frac{1 \times 5.04854}{\sqrt{8.33}}}$$

$$V_{sc} = 8.78295 \text{ (pie/min)}$$

NUMERO 2.- Caso para flujo laminar y transicional $N_R > 100$

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO

$$\rho_f = 8.33 \text{ (lb/gal).}$$

DENSIDAD DE LA PARTICULA

$$\rho_p = 23.59 \text{ (lb/gal).}$$

DIAMETRO DE LA PARTICULA

$$D_s = 1.00 \text{ (pgl).}$$

ESPEOSR DE LA PARTICULA

$$H = 0.50 \text{ (pgl).}$$

INDICE DE CONSISTENCIA

$$K = 2.72$$

INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS

$$N = 0.399$$

VELOCIDAD ANULAR

$$V_A = 100 \text{ (pie/min).}$$

SOLUCION

$$\begin{aligned} \tau_e &= 7.9 \sqrt{H (\rho_a - \rho_l)} \\ &= 7.9 \sqrt{0.5 \text{ m} (23.59 - 8.33)} \end{aligned}$$

$$\tau_e = 21.82 \text{ [lb/100 pie}^2\text{]}$$

$$\tilde{\gamma} = \left(\frac{\tau_e}{K} \right)^{1/N}$$

$$= (21.82 / 2.72)^{1/0.899}$$

$$\tilde{\gamma} = 184.7001 \text{ [seg}^{-1}\text{]}$$

$$\mu_A = 511 \frac{\tau_e}{\tilde{\gamma}}$$

$$= 511 \text{ m} (21.82 / 184.70018)$$

$$\mu_A = 60.36822 \text{ [cp]}$$

$$N_R = \frac{15.47 \rho_l D_s V_{ss}}{\mu_A}$$

$$= 15.47 \text{ m} \frac{8.33 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 100}{60.36822}$$

$$= 213.46515$$

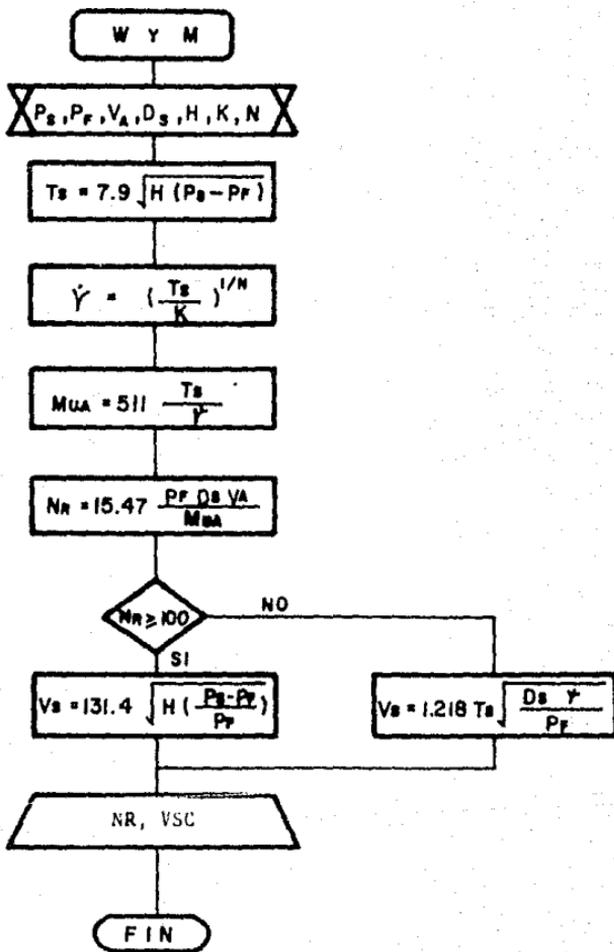
como $N_R > 100$ se usa la siguiente ecuación:

$$V_{ac} = 131.4 \sqrt{\frac{H (\rho_e - \rho_l)}{\rho l}}$$

$$= 131.4 \sqrt{\frac{0.50 * (23.59 - 8.33)}{8.33}}$$

$$= 129.75786 \text{ (pie/min)}$$

DIAGRAMA DE FLUJO
 MODELO DE WALKER Y MAYES



```

REM PROGRAMA FRA EL MODELO DE WALKER Y MAYES
REM
REM INFORMACION REQUERIDA PARA EL MODELO
COLOR 15, 1
CLS
PLAY "FD"
PRINT "
                                INFORMACION REQUERIDA"
PRINT "
                                PARA EL MODELO DE WALKER Y MAYES "
PRINT
INPUT "DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal) :", ROF
INPUT "DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal): ", ROS
INPUT "VELOCIDAD ANULAR (pie/min): ", va
INPUT "DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg): ", DS
INPUT "ESPESOR DE LA PARTICULA (pq): ", H
INPUT "INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim): ", N
INPUT "INDICE DE CONSISTENCIA (lb-seg^n/100 pie^2): ", K
TS = 7.9 * SQR(H * (ROS - ROF))
GAMA = (TS / K) ^ (1 / N)
MUA = 511 * (TS / GAMA)
NR = 15.47 * (ROF * DS * va) / MUA
IF NR >= 100 THEN
VSC = 131.4 * SQR(H * (ROS - ROF) / ROF)
ELSE
VSC = 1.218 * TS * SQR((DS * GAMA) / (ROF ^ .5))
END IF
PRINT
PRINT "
                                R E S U L T A D O S   O B T E N I D O S "
PRINT
PRINT "NUMERO DE REYNOLDS                (adim)                ", NR
PRINT "VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min)  ", VSC
END

```

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE WALKER Y MAYES

DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal) :8.33
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal): 23.59
VELOCIDAD ANULAR (pie/min): 100
DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg): 1
ESPESOR DE LA PARTICULA (pg): 0.031
INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim): .327
INDICE DE CONSISTENCIA (lb-segⁿ/100 pie²): 3.20

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

NUMERO DE REYNOLDS (adim) 23.43123
VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min) 8.752946

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE WALKER Y MAYES

DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal) :8.33
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal): 23.59
VELOCIDAD ANULAR (pie/min): 100
DIAMETRO DE LA PARTICULA (pg): 1
ESPESOR DE LA PARTICULA (pg): .5
INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim): .399
INDICE DE CONSISTENCIA (lb-segⁿ/100 pie²): 2.72

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

NUMERO DE REYNOLDS (adim) 211.4482
VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO (pie/min) 125.7579

ALGORITMO DE CALCULO PARA LA CORRELACION DE H. UDO ZEIDLER

El desarrollo de cálculo de este modelo es de tipo iterativo, ya que se requiere que la velocidad calculada se encuentre dentro de cierto rango del número de Reynolds, el cual se encuentra en función de las propiedades físicas y reológicas del fluido, y las características geométricas de la partícula.

PROCEDIMIENTO DE CALCULO

Como primer paso se determina el coeficiente de la velocidad de corte equivalente del fluido, F_y , cuya ecuación es la siguiente:

$$F_y = (CN) \left[\frac{D_s}{D_r} \right]^{ECN}$$

donde:

$$CN = (1 - N) / 2$$

y

$$ECN = (N + 5) (1.1 - 0.08 \sqrt{1 - N^2})$$

Posteriormente se calcula el número de Reynolds, Na , para la F_y obtenida, en este momento se necesita usar una velocidad de asentamiento inicial supuesta, V_{ss} , se recomienda sea igual a la velocidad anular proporcionada como dato, V_a , que se encuentre en el sistema o la que previamente se ha programado para ese punto de la perforación, entonces:

$$V_{ss} = V_A$$

luego:

$$N_R = \frac{\rho l V_s^{(2-N)} D_s^N}{K F_r^{(N-1)}}$$

El siguiente paso es obtener el coeficiente de arrastre, mejor conocido como coeficiente de fricción, C_D , existen cuatro alternativas para su cálculo, pero éstas están en función del valor que tenga el número de Reynolds calculado, N_R , como se muestra en la descripción:

$$\text{Si } N_R < = 1$$

$$C_D = \frac{28,2}{N_R}$$

$$\text{Si } 1 < N_R < = 10$$

$$C_D = \frac{24}{N_R} (1 + 0,178 N_R^{0,045})$$

$$\text{Si } 10 < N_R < = 600$$

$$C_D = \frac{31,5}{N_R} (1 + 0,03068 N_R^{1,045})$$

Si $N_R > 600$

$$C_D = 1.357$$

A continuación se hace el cálculo de la velocidad:

$$V_s = 8.0248 \left[\frac{(p_a - p_f) D_i}{\rho f C_D} \right]^{1/2}$$

La velocidad de asentamiento final se determina como:

$$V_{sc} = 21.9 * V_s$$

El siguiente paso es comparar la velocidad obtenida con la supuesta, donde se comprobará si la diferencia entre ambas, FAC, es menor del 0.5 %, valor que permitirá obtener una precisión muy adecuada. El cálculo del factor se lleva a cabo de la siguiente manera:

$$FAC = \left| \frac{V_{ss} - V_{sc}}{V_{ss}} \right|$$

Si $FAC = > 0.5$ se concluye el ciclo

Las variables empleadas son:

- F_r : Coeficiente de la velocidad de corte [adm].
C_d : Coeficiente de arrastre [adm].
K : Índice de consistencia [lb-seg^N/100 pie²].
D_s : Diámetro equivalente a una esfera con el mismo volumen [pg].
N : Índice de comportamiento de la ley de potencias [adm].
D_i : Diámetro menor de la partícula [pg].
ρ_s : Densidad de la partícula [lb/gal].
ρ_f : Densidad del fluido [lb/gal].
V_{ss} : Velocidad de asentamiento supuesta [pie/min].
V_A : Velocidad anular del fluido [pie/min].
V_{sc} : Velocidad de asentamiento final [pie/min].

EJEMPLO

DATOS:

DENSIDAD DEL FLUIDO	ρ _f = 8.33 [lb/gal]
DENSIDAD DE LA PARTICULA	ρ _s = 23.50 [lb/gal]
DIAMETRO EQUIVALENTE A UNA ESFERA	D _s = 1.00 [pg]
DIAMETRO MENOR DE LA PARTICULA	D _i = 0.25 [pg]
INDICE DE CONSISTENCIA	K = 3.20 [lb-seg ^N /100 pie ²]
INDICE DE COMP. DE FLUJO	N = 0.327 [adm]
O INDICE DE COMP. LEY DE POTENCIAS	
VELOCIDAD ANULAR	V _A = 100 [pie/min]

SOLUCION

$$F_r = (CN) \left[\frac{D_s}{D_i} \right]^{N(N)}$$

$$\text{donde } r(N) = (1 - N) / 2$$

$$= (1 - 0.327) / 2$$

$$r(N) = 0.3365$$

y

$$EC(N) = CN + 5) (1.1 - 0.08 \sqrt{1 - N^2})$$

$$= (0.327 + 5) * (1.1 - 0.08 * \sqrt{1 - 0.327^2})$$

$$EC(N) = 0.02024$$

entonces:

$$F_y = r(N) \left[\frac{D_s}{D_i} \right]^{E(N)}$$

$$= 0.3365 * \left[\frac{1.0}{0.25} \right]^{0.02024}$$

$$F_y = 1.2152$$

A partir de este momento se inicia el ciclo

PRIMER CICLO

$$V_{ss} = V_A = 100 \text{ (pie/min)}$$

$$N_A = \frac{\rho_s V_s^{(2-N)} D_s^N}{K F_y^{(N-1)}}$$

$$23.59 \times 100^{(2-0.927)} \times 1.00^{0.927}$$

$$3.2 \times 1.2152^{(0.927 - 1)}$$

$$N_A = 18\ 644$$

como $N_A > 500$

$$C_D = 1.357$$

entonces:

$$V_{sc} = 8.0248 \left[\frac{(p_s - p_t) D}{\rho C_D} \right]^{1/2}$$

$$V_{sc} = 8.0248 \left[\frac{(23.59 - 8.33) \times 0.25}{8.33 \times 1.357} \right]^{1/2}$$

$V_{sc} = 3.5$ este valor se debe comparar con el anterior, por medio de la siguiente expresión:

$$FAC = \left| \frac{V_{ss} - V_{sc}}{V_{ss}} \right|$$

$$FAC = \left| \frac{100 - 3.5}{100} \right|$$

$$FAC = .965$$

Como se cumple que $FAC = > 0.5\%$, se concluye el cálculo.

$$V_{ss} = V_{sc} = 3.5$$

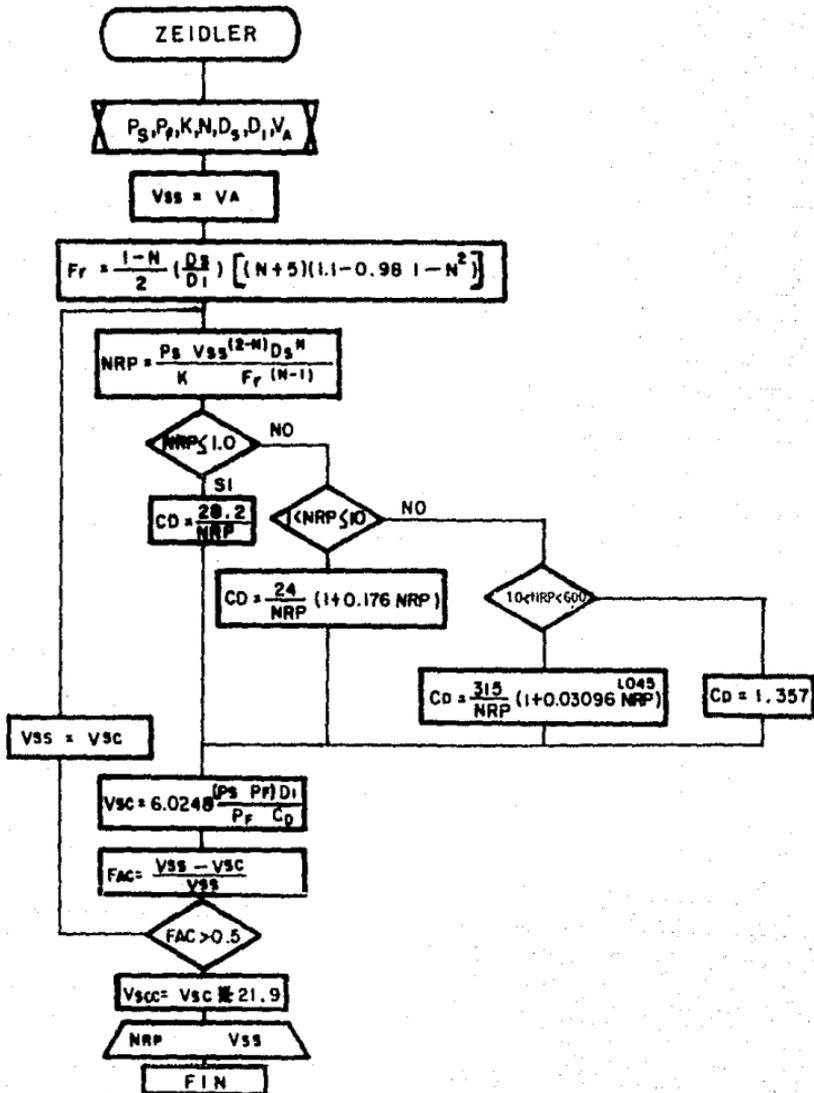
Como último paso la V_{sc} resultante se multiplica por el factor 21.0, para obtener la velocidad de asentamiento real en unidades de campo.

$$V_{sc} = 21.0 \times V_{sc}$$

$$= 21.9 \times 3.5$$

$$V_{sc} = 76.65 \text{ (pi}^{\circ}/\text{min)}$$

DIAGRAMA DE FLUJO
 MODELO DE H. UDO ZEIDLER



```

M PROGRAMA PARA EL MODELO DE H. UDD ZEIDLER
REM
REM INFORMACION PROPORCIONADA AL MODELO
REM
COLOR 15, 1
CLS
PLAY "FD"
PRINT "
                INFORMACION REQUERIDA"
PRINT "
                PARA EL MODELO DE H. UDD ZEIDLER "
PRINT
INPUT "DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal)= ": ROF
INPUT "DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal)= ": ROS
INPUT "INDICE DE CONSISTENCIA (lb-segn/100 pie2n)= ": i
INPUT "INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim)=": n
INPUT "DIAMETRO EQUIVALENTE A UNA ESFERA CON EL MISMO VOLUMEN (pg)= ": ds
INPUT "DIAMETRO MENOR DE LA PARTICULA (pg)= ": di
INPUT "VELOCIDAD ANULAR DEL FLUIDO (pie/min)= ": va
vss = va
ft = (n + 5) * (1.1 - .98 * SQR(1 - (n - 2)))
FT = ((1 - n) / 2) * ((ds / di) ** ft)
123 NR = (ROS * (vss ** (2 - n)) * (ds ** n)) / (k * (FT ** (n - 1)))
IF NR <= 1 THEN
cd = 28.2 / NR
ELSE
IF NR <= 10 THEN
cd = (24 / NR) * (1 + .176 * (NR ** .64))
ELSE
IF NR <= 600 THEN
cd = (31.5 / NR) * (1 + .03096 * (NR - 1.045))
ELSE
cd = 1.357
END IF
END IF
END IF
VSC = 6.0248 * SQR((ROS - ROF) * di / (ROF * cd))
FAC = (ABS(VSC - VSS) / vss)
IF FAC > .5 THEN
vss = VSC
GOTO 123
END IF
VSC = VSC * 21.9
DECP
COLOR 14, 1
PRINT
PRINT "
                RESULTADOS OBTENIDOS "
PRINT
COLOR 15, 1
PRINT "
                TRAZADO DE TORNILLOS = ", NR
PRINT "
                VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO SUGERIDA = ", VSC
END

```

INFORMACION REQUERIDA
PARA EL MODELO DE H. UDO ZEIDLER

DENSIDAD DEL FLUIDO (lb/gal)= 7.8.33
DENSIDAD DE LA PARTICULA (lb/gal)= 7.33.59
INDICE DE CONSISTENCIA (lb-seg^{1/n}/100 pie²)= 7.3.20
INDICE DE LA LEY DE POTENCIAS (adim)=7.327
DIAMETRO EQUIVALENTE A UNA ESFERA CON EL MISMO VOLUMEN (pg)= 7.1
DIAMETRO MENOR DE LA PARTICULA (pg)= 7.25
VELOCIDAD ANULAR DEL FLUIDO (pie/min)= 7.100
NUM. REYNOLDS = 18643.96 FAC= 96.49992 VSC= 3.500076

R E S U L T A D O S O B T E N I D O S

NUMERO DE REYNOLDS : 18643.96
COEF. DE LA VEL. DE CORTE EQUIVALENTE DEL FLUIDO : 1.215167
VELOCIDAD DE ASENTAMIENTO SUPUESTA : 76.65166

D A T O S

		F_1	F_2	F_3
Diámetro del pozo o T.R	(pg)	9.5	9.5	9.5
Diámetro de la T.P	(pg)	5.0	5.0	5.0
Diámetro de la partícula	(pg)	0.25	0.25	0.3
Densidad de la partícula	(lb/gal)	21.0	21.0	21.0
Densidad del fluido	(lb/gal)	10.5	12.0	14.0
Viscosidad plástica	(cp)	12.0	17.0	22.0
Esfuerzo de cedencia (lb/100 pies ²)		12.0	18.0	13.5
Índice de comportamiento de flujo o Ley de Potencias	(adm)	0.33	0.53	0.48
Índice de consistencia (lb/seg ⁿ /100 pies ²)		3.2	0.87	1.2

F_1 ES UN FLUIDO CROMOLIGNOSULFONADO CLS

F_2 ES UN FLUIDO THERMADRILL

F_3 ES UN FLUIDO EMULSIONADO (PERFOIL)

RELACIONES DE TRANSPORTE												
V_A	F_1				F_2				F_3			
pie/min	CHIEN	UDO	MAYES	MOORE	CHIEN	UDO	MAYES	MOORE	CHIEN	UDO	MAYES	MOORE
30	0.44	0.80	0.179	0.585	0.219	0.236	0.331	0.362	0.387	0.558	0.263	0.498
60	0.28	0.91	0.41	0.785	0.46	0.117	0.235	0.756	0.513	0.743	0.365	0.775
90	0.52	0.93	0.607	0.853	0.584	0.745	0.556	0.835	0.505	0.533	0.484	0.445
120	0.63	0.95	0.705	0.888	0.688	0.806	0.667	0.870	0.721	0.589	0.613	0.864

TABLA (1.1)

RELACION DE TRANSPORTE = $(V_A - V_G)/V_A$

V_A = Velocidad angular

V_G = Velocidad de resbalamiento o asentamiento

		VELOCIDADES DE ASENTAMIENTO pie/min											
V_A	F ₁				F ₂				F ₃				
pie/min	CHIEF	UDO	MAYES	MOORE	CHIEF	UDO	MAYES	MOORE	CHIEF	UDO	MAYES	MOORE	
30	43.25	5.59	35.57	12.46	36.50	22.97	39.92	19.15	27.14	13.27	37.89	15.05	
60	43.25	5.60	35.37	12.89	32.14	22.97	39.92	14.77	23.21	15.02	37.89	13.59	
90	43.25	5.60	35.37	13.15	37.46	22.97	39.92	18.57	35.5	15.02	46.57	13.77	
120	43.25	5.72	35.37	13.34	37.46	23.21	39.92	14.92	32.5	13.27	46.46	13.90	

T A B L A (1)

CONCLUSIONES

La importancia de los fluidos de perforación estriba en que el programa a realizar durante la perforación de un pozo se lleve a cabo con eficiencia, economía y seguridad.

En este trabajo se evalúan los modelos de Preston L. Moore, Sze Foo Chien, Walker y Mayes y H. Udo Zeidler, para predecir la velocidad de asentamiento.

A continuación se mencionan las principales observaciones de los resultados obtenidos en las evaluaciones:

1.- Durante la perforación es esencial el transporte de los recortes del fondo del pozo a la superficie, para propiciar mayores velocidades de penetración y evitar una serie de problemas que incrementan los costos.

2.- El transporte de los recortes depende principalmente de las características reológicas del fluido y de su velocidad de circulación.

3.- El valor de la viscosidad deberá controlarse para obtener el óptimo desplazamiento de los recortes a la superficie. Las condiciones reológicas y tixotrópicas se controlan con el empleo de aditivos y pruebas piloto que se efectúan tanto en el campo como en el laboratorio. La velocidad de asentamiento de una partícula a través de un fluido de perforación depende de la densidad, la viscosidad y la gelatinosidad o tixotropía del fluido.

4.- De los resultados obtenidos con los diferentes modelos experimentales analizados en este trabajo, para predecir la velocidad de asentamiento de la partícula generada por la acción cortante de la barrena, con fluidos que se usan en el campo, el modelo de Preston L. Moore, se considera el más apropiado, para predecir la velocidad de asentamiento. Con los resultados de este, se observa que una velocidad de 30 pies/min es suficiente

para transportar los recortes a la superficie, para los fluidos F_i y F_a , ya que se obtienen relaciones de transporte mayores o iguales a 0.8 como se muestra en la tabla 1.1.

B I B L I O G R A F I A

1. - Zeldler, H. Udo: "An Experimental Analysis of Transport of Drilled Particles" Soc. Pet. Eng. J., (1972), VOL. 12, No. 1, pp 39 - 48.
2. - Chien, Sze - Foo: "Anular Velocity of Rotary Drilling Operations" Rock Mech. Min. SCI., (1972), VOL. 9, pp 403-416.
3. - Moore, Preston L., And Cole, Frank W.: Drilling Operations Manual, The Petroleum Publishing Co., Tulsa (1985), 10-2.
4. - Moore, Preston L.: Drilling Practice Manual, The Petroleum Publishing Co., (1974), pp 228.
5. - Walker, R.E. and Mayes, T. N.: "Design of Muds for Carrying Capacity" Trans. AIME, VOL. 280, (1978), pp 803.
6. - Williams, C. E. and Bruce, G. H.: "Carrying Capacity of Drilling Muds" Trans. AIME, (1981), VOL. 102, pp 111 -120.
7. - Hopkin, E. A.: "Factors Affecting Cuttings Removal During Rotary Drilling" Trans. AIME., VOL. 240, pp 907 - 914.

9. - Sample, K. J. and Burgoyne, A. T.: "An Experimental Evaluation of Correlation Used for Predicting Cutting Slip Velocity" S. P. E. Paper No. 6645, (1977).
9. - Sample, K. J. and Burgoyne, A. T.: "Development of Improved Laboratory and Field Procedures for Determining the Carrying Capacity of Drilling Fluids" S. P. E. Paper No. 7407 (1978).
10. - Hussaini, S. M. M. : "A Study of the Applicability of Zeidler's Transport Model of Actual Drilling Mud Carrying Capacity" M. S. Thesis, U. of Tulsa (1977).
11. - Boulet, D. P.: "A Study of the Applicability of the Zeidler's Transport Model to Hole Geometry Variation", M. S. Thesis, U. of Tulsa (1974).
12. - Sifferman, T. R., Myers, G. M., Haden, E. L. and Wahl, H. A.: "Drill Cutting Transport in Full Vertical Annuli" J. P. T. (Nov. 1974), pp 1205 - 1302.
13. - Pigott, R. J. S.: "Mud Flow in Drilling" Drilling and Production Practice (1949), 129, No. 13, pp 114 - 118.
14. - Burgoyne, A. T. and Young, F. S.: "Applied Drilling Engineering" Preprint of S. P. E. Text Book on Drilling.