



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MÉTODO DE PRUEBA PARA LA
DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE
FILTRADO DINÁMICO A ALTA PRESIÓN Y
A ALTA TEMPERATURA PARA FLUIDOS
DE PERFORACIÓN BASE AGUA**

TESIS PROFESIONAL
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A :
JOSÉ ROBERTO MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

Director de tesis: Ing. María Cristina Avilés Alcántara



MÉXICO D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA

2011

MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE FILTRADO DINÁMICO A ALTA PRESIÓN Y A ALTA TEMPERATURA PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

Contenido	Página
PREFACIO	1
CÁPITULO I	
GENERALIDADES	2
I.I Definición de fluido de perforación.	2
I.II Funciones del fluido de perforación.	2
I.II.I Retirar los recortes del pozo.	2
I.II.II Controlar las presiones de formación.	3
I.II.III Suspender y descargar los recortes.	3
I.II.IV Obturar las formaciones permeables.	3
I.II.V Mantener la estabilidad del pozo.	4
I.II.VI Minimizar los daños a la formación.	4
I.II.VII Enfriar, lubricar, apoyar la barrena y el conjunto de perforación.	4
I.II.VIII Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la barrena.	5
I.II.IX Asegurar una evaluación adecuada de la Formación.	5
I.II.X Controlar la corrosión.	6

I.II.XI	Facilitar la cementación y la complementación.	6
I.II.XII	Minimizar el impacto al ambiente.	6
I.III	Factores que afectan la selección de un fluido de perforación.	6
I.IV	Propiedades físicas y químicas de los fluidos de perforación	8
I.IV.I	Densidad	8
I.IV.II	Propiedades reológicas	8
I.IV.III	Ph de lodo y alcalinidad	12
I.V	Modelos reológicos	13
I.V.I	Modelo Newtoniano	13
I.V.II	Modelo plástico de Bingham	14
I.V.III	Ley de potencias	15
I.V.IV	Modelo de ley de potencias mejorado	18
I.VI	Clasificación de los fluidos de perforación	18
 CÁPITULO II		
	TEORIA DEL FILTRADO Y PROPIEDADES DE FILTRADO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN	23
II.I	Pérdida instantánea de filtrado (spurt loss)	24
II.II	Filtración estática.	26
II.II.I	Teoría del filtrado estático.	26

II.II.II	Relación entre el tiempo y el volumen de filtrado.	28
II.II.III	Relación entre la presión y el volumen de filtrado.	30
II.II.IV	Relación entre la temperatura y el volumen de filtrado.	32
II.II.V	Espesor del enjarre.	34
II.II.VI	Permeabilidad del enjarre.	38
II.II.VII	Efecto del tamaño y forma de la partícula sobre la permeabilidad del enjarre.	40
II.II.VIII	Efecto de la floculación y acumulación sobre la permeabilidad del enjarre.	44
II.II.IX	Proceso de construcción del enjarre	45
II.II	Filtración dinámica.	49
II.II.I	Ciclo de filtrado en la perforación de un pozo.	54
II.II.II	Filtrado bajo la barrena.	56
II.II.III	Evaluación de la velocidad de filtrado en el fondo del pozo.	60
 CÁPITULO III		
	MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE FILTRADO DINÁMICO A ALTA PRESIÓN Y A ALTA TEMPERATURA PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.	64
III.I	Descripción general de operación del Fann 90.	66
III.I.I	Sistema de control de presión	66
III.I.II	Sistema de calentamiento y enfriamiento	66

III.I.III Sistema de control de velocidad de corte	67
III.I.IV Sistema de filtrado	67
III.I.V Sistema de purga	68
III.II Funciones del teclado.	69
III.III Funciones de pantalla.	71
III.IV Opciones de una secuencia de prueba.	74
III.V Programación de la secuencia de una prueba.	78
III.VI Ejecutar una prueba.	83
III.VII Verificando el volumen de filtrado.	93
III.VIII Procedimiento de calibración.	94
III.IX Transferencia de datos a la computadora.	97
CÁPITULO IV	
RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO	99
IV.I El mesurando y la incertidumbre.	99
IV.II Modelo físico.	101
IV.III Modelo matemático.	102
IV.IV Identificación de las fuentes de incertidumbre.	103
IV.V Cuantificación.	103
IV.VI Distribuciones de probabilidad.	106
IV.VII Distribución rectangular de probabilidad.	108
IV.VIII Incertidumbre expandida	111

IV.VIII.I Factor de cobertura y nivel de confianza	111
IV.IX Resultados experimentales de las pruebas de laboratorio	112
IV.IX.I Formulación y Reología de los fluidos A y B empleados en las pruebas de filtrado dinámico	113
IV.IX.II Resultados del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.	118
CÁPITULO V	
VALIDACIÓN DEL MÉTODO	125
V.I Definición de la validación de un método	125
V.II ¿Por qué deben validarse los métodos?	126
V.III ¿Cuándo deben validarse los métodos?	126
V.IV Objetivos de la validación de un método	127
V.V ¿Cómo deben validarse los métodos?	128
V.VI Parámetros de aplicación en la validación de métodos	128
V.VI.I Límite de detección	129
V.VI.II Límite de cuantificación	129
V.VI.III Exactitud	130
V.VI.IV Precisión	131
V.VI.V Reproducibilidad	132
V.VI.VI Repetibilidad	132
V.VI.VII Robustez	133

V.VII Validación del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.	134
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFÍA	142

PREFACIO

La evaluación del volumen de filtrado bajo condiciones dinámicas, es el objetivo de estudio de la presente tesis. El fenómeno de filtrado, está sujeto a diferentes factores que afectan su comportamiento dentro de las paredes del pozo. Cada uno de estos factores es detallado en los capítulos subsiguientes.

El fenómeno de filtrado que se encuentra presente en cada una de las diferentes etapas de perforación de un pozo petrolero, es un factor que interviene en el desarrollo de la perforación del pozo. Por tal razón, es conveniente contar con información confiable en los resultados obtenidos durante una medición del volumen e filtrado. El método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, proporciona la serie de pasos que se deben seguir para determinar el volumen de filtrado dinámico bajo diferentes condiciones de operación que simulan las etapas que se presentan durante la perforación de un pozo. Esta evaluación de filtrado, es determinada por el equipo de laboratorio Fann modelo 90, y simula las condiciones de presión diferencial, velocidad de corte, temperatura y permeabilidad de la formación. Este procedimiento será detallado en el capítulo tres de la presente tesis.

Al contar con los resultados concernientes a la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua. Fue importante verificar que tan confiables habían sido los resultados obtenidos por el método de prueba. Por tal motivo fue necesario introducirse en la teoría de la validación de métodos, con el fin de verificar si los resultados obtenidos habían sido confiables o no. Esto con el fin de validar o no la confiabilidad de resultados obtenidos por el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

Durante la perforación de pozos petroleros el principal objetivo es realizar un conducto que comunique la zona de hidrocarburos con la superficie. En esta actividad el fluido de perforación o también llamado lodo de perforación desempeña funciones muy importantes que ayudan a la realización de dicho objetivo.

I.I DEFINICIÓN DE FLUIDO DE PERFORACIÓN

El lodo de perforación o fluido de control se define como un fluido en donde se encuentran suspendidos aditivos químicos en estado sólido y líquido que proporcionan propiedades físico-químicas adecuadas para las condiciones operativas y las características litológicas de la formación a perforar. El fluido en donde se encuentran suspendidos los aditivos se conoce como FASE CONTÍNUA y las partículas suspendidas constituyen la FASE DISCONTÍNUA.

I.II FUNCIONES DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Las funciones del fluido de perforación describen las tareas que este debe ser capaz de desempeñar, aunque algunas de estas no sean esenciales en cada pozo. A continuación se enlista cada una de ellas.

I.II.I Retirar los recortes del pozo: Los recortes que se generan a medida que la barrena perfora la roca son retirados y llevados a la superficie por medio del fluido de perforación. Esto gracias a que el fluido es bombeado en superficie por medio de bombas pasando a través de la tubería de perforación hasta ser expulsado a alta presión en las toberas de la barrena. La remoción de los recortes (limpieza del

pozo) depende del tamaño, forma y densidad de los recortes; unidos a la velocidad de penetración y también de la viscosidad, densidad y velocidad anular del fluido.

I.II.II Controlar las presiones de formación: El lodo de perforación debe controlar las presiones de formación para garantizar una perforación segura. Típicamente a medida que la presión de formación aumenta, se incrementa la densidad del fluido de perforación agregando barita para equilibrar las presiones y así mantener la estabilidad del pozo. Esto impide que los fluidos de formación fluyan hacia el pozo y estos causen inestabilidad en el pozo. El peso del lodo utilizado para perforar un pozo se encuentra limitado por el peso mínimo necesario para poder controlar las presiones de formación y el peso máximo es el que no logre fracturar la formación. En la práctica conviene utilizar el peso mínimo del lodo que asegure el control y la estabilidad del agujero.

I.II.III Suspender y descargar los recortes: Los lodos o fluidos de control deben ser capaces de suspender los recortes que se generan durante la perforación, los materiales densificantes y los aditivos son los que hacen posible que el lodo de perforación adquiera las características necesarias para suspender los recortes.

Los asentamientos ocurren con más frecuencia bajo condiciones dinámicas en pozos direccionales con un alto ángulo de inclinación donde el fluido está circulando a bajas velocidades angulares.

I.II.IV Obturar las formaciones permeables: Cuando la presión de la columna de lodo es mayor a la presión de la formación, el lodo se precipita a la formación y un revoque se deposita en la pared del pozo. Los sistemas de los fluidos de perforación deben de estar diseñados para depositar sobre la formación un delgado revoque o también llamado enjarre de baja permeabilidad con el fin de limitar la invasión del filtrado. Esto mejora la estabilidad del pozo y evita numerosos problemas en las operaciones de perforación y producción.

I.II.V Mantener la estabilidad del pozo: La estabilidad del pozo se logra mediante un equilibrio complejo de factores mecánicos como son (presiones y esfuerzos) y factores químicos. La composición química y las propiedades del lodo deben combinarse para proporcionar un pozo estable hasta que se llegue a introducir y cementar la tubería de revestimiento.

Independientemente de la composición química del fluido además de otros factores, el peso del lodo debe de estar comprendido dentro del intervalo necesario para equilibrar las fuerzas mecánicas que actúan sobre el pozo (presión de formación, esfuerzos que actúan sobre el pozo relacionados con la dirección y la tectónica), esto para lograr una operación de perforación segura.

I.II.VI Minimizar los daños a la formación: Es de suma importancia el proteger el yacimiento contra los posibles daños que pueda causar el fluido de perforación. Cualquier reducción en la porosidad o cambio en la permeabilidad de la formación productora se considera como daño. El tipo de procedimiento y método de complementación del pozo, determinará el nivel de protección que requerirá la formación. Los fluidos de rehabilitación y de terminación pueden ser usados para minimizar los daños a la formación.

I.II.VII Enfriar, lubricar, apoyar la barrena y el conjunto de perforación: Durante la perforación las fuerzas mecánicas e hidráulicas generan una cantidad considerable de calor generado por la fricción que existe entre la barrena al romper las rocas de la formación y por el roce que existe entre la columna de perforación rotaria contra la tubería de revestimiento y el pozo. Gracias a la circulación del fluido de perforación se logra enfriar la barrena y a todo el conjunto de perforación, distribuyendo el calor a todo el largo del pozo alcanzando inclusive temperaturas más bajas que la de fondo. El fluido de perforación también ayuda a soportar una porción del peso

de la columna de perforación mediante la flotabilidad, esto gracias a que el fluido aporta una fuerza igual al peso del fluido desplazado por la tubería, manteniéndola en flotación reduciendo la carga del gancho de la torre de perforación.

I.II.VIII Transmitir la energía hidráulica a las herramientas y a la barrena: La energía hidráulica puede ser utilizada para maximizar la velocidad de penetración, mejorando la remoción de recortes en la barrena. Esta energía también alimenta los motores de fondo que hacen girar la barrena y las herramientas de medición al perforar. Los programas de hidráulica se basan en el dimensionamiento correcto de las toberas de la barrena para utilizar la potencia disponible (presión) de la bomba de lodo a fin de maximizar la caída de presión en la barrena y optimizar la fuerza de impacto del chorro sobre el fondo del pozo.

I.II.IX Asegurar una evaluación adecuada de la formación: Una correcta evaluación de la formación es esencial para obtener un éxito en la operación de perforación. Estos métodos de evaluación suelen ser afectados por el fluido de perforación. Por ejemplo, si los recortes se dispersan en el lodo, el geólogo no tendrá nada que evaluar en superficie. O si el transporte de los mismos no es bueno, será difícil para el geólogo determinar la profundidad en la cual los recortes se originaron. El lodo de perforación también afecta en los registros por ellos es recomendable utilizar un tipo de lodo de acuerdo a la operación que se vaya a realizar. Por ejemplo, las extracciones de núcleos se realizan con lodos suaves y con una cantidad mínima de aditivos.

I.II.X Controlar la corrosión: Los componentes de la columna de perforación y tubería de revestimiento que se encuentran constantemente en contacto con el fluido de perforación están propensos a diversas formas de corrosión. Los gases disueltos tales como el oxígeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno pueden

causar graves problemas de corrosión tanto en la superficie como en el fondo del pozo. Por lo tanto la función del fluido de perforación es mantener la corrosión en un nivel aceptable. Además de proteger la superficies metálicas contra la misma.

I.II.XI Facilitar la cementación y la complementación: Durante la introducción de la tubería de revestimiento, el lodo debe minimizar el “suabeo” y el “pistoneo”, de manera que no se produzca ninguna pérdida de circulación inducida por las fracturas. Resulta más fácil introducir la tubería de revestimiento dentro de un pozo liso, de calibre uniforme y sin recortes o derrumbes.

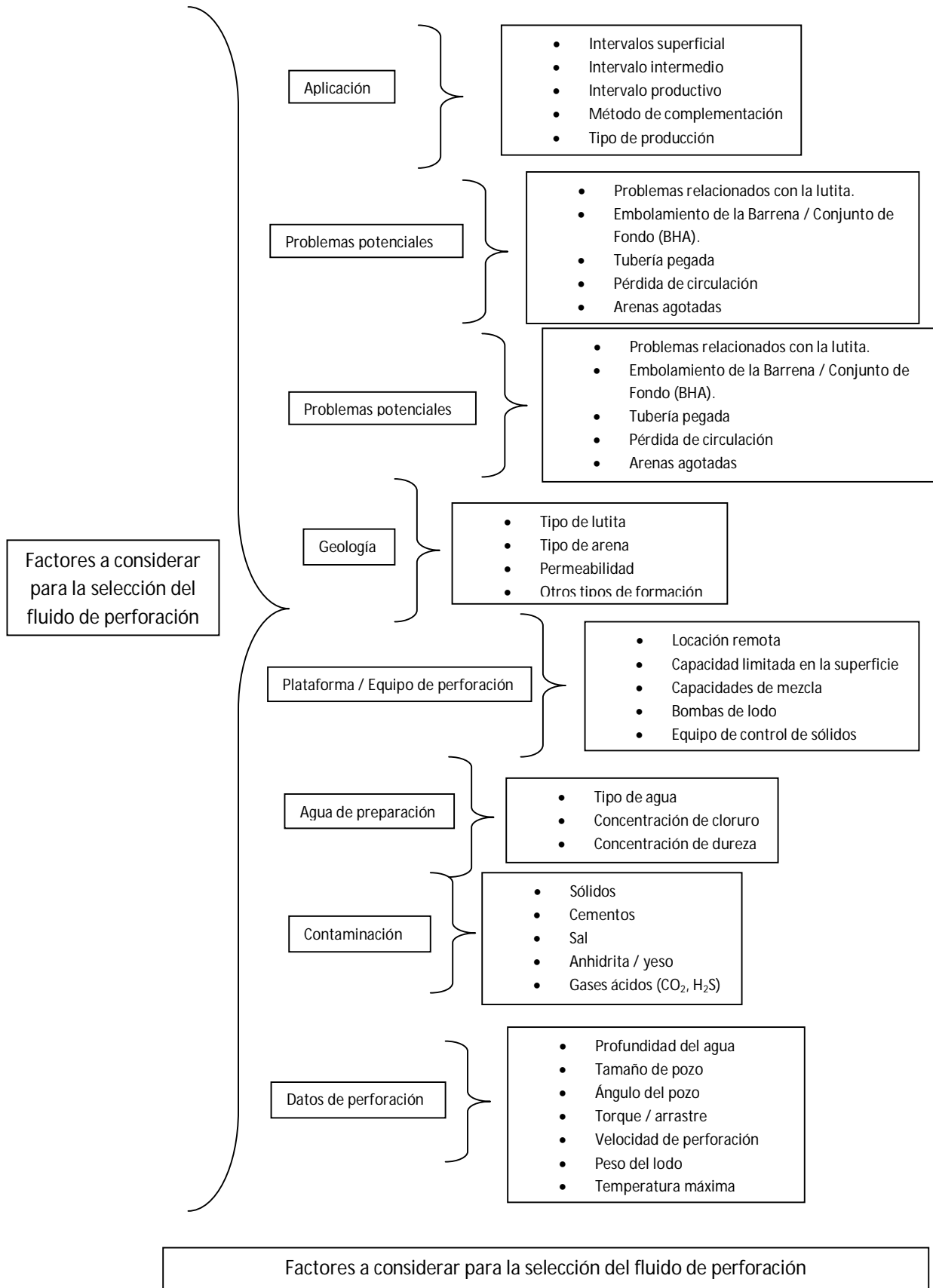
I.II.XII Minimizar el impacto al ambiente: Con el tiempo el fluido de perforación se convierte en un desecho y debe ser limpiado con forme a los reglamentos ambientales locales. Los fluidos de bajo impacto ambiental pueden ser limpiados en la cercanía, y por lo tanto son los más adecuados para utilizar.

I.III FACTORES QUE AFECTAN LA SELECCIÓN DEL FLUIDO DE PERFORACIÓN

Si deseamos tener una operación exitosa durante la operación de perforación, es vital realizar una correcta selección del fluido de perforación. De lo contrario, puede causar problemas en la perforación que son difíciles de corregir.

Los siguientes factores son claves para la selección del fluido de perforación y es recomendable considerarlos.

Generalidades



I.IV PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Las propiedades físicas y químicas de un fluido de perforación son monitoreadas para facilitar el proceso de perforación. Estas propiedades contribuyen a varios aspectos importantes para la perforación exitosa de un pozo. Por ello, las propiedades se verifican sistemáticamente en el pozo y se registran en un formulario denominado informe de lodo API.

I.IV.I Densidad

Para efectos prácticos, la densidad significa el peso por volumen unitario del fluido de perforación. Es uno de los parámetros más importantes durante la operación de perforación, pues contrarresta la presión de formación, esta se mide pesando el lodo en una balanza de lodo donde se lee directamente su valor. Puede ser expresada como gradiente de presión hidrostática en psi/1000 ft (ó en otro sistema de unidades) partiendo de la definición de presión $P = \rho gh$ donde P =presión, ρ =densidad, g =gravedad y h =altura de la columna de fluido; pero de ser expresada así, se debe considerar la profundidad vertical.

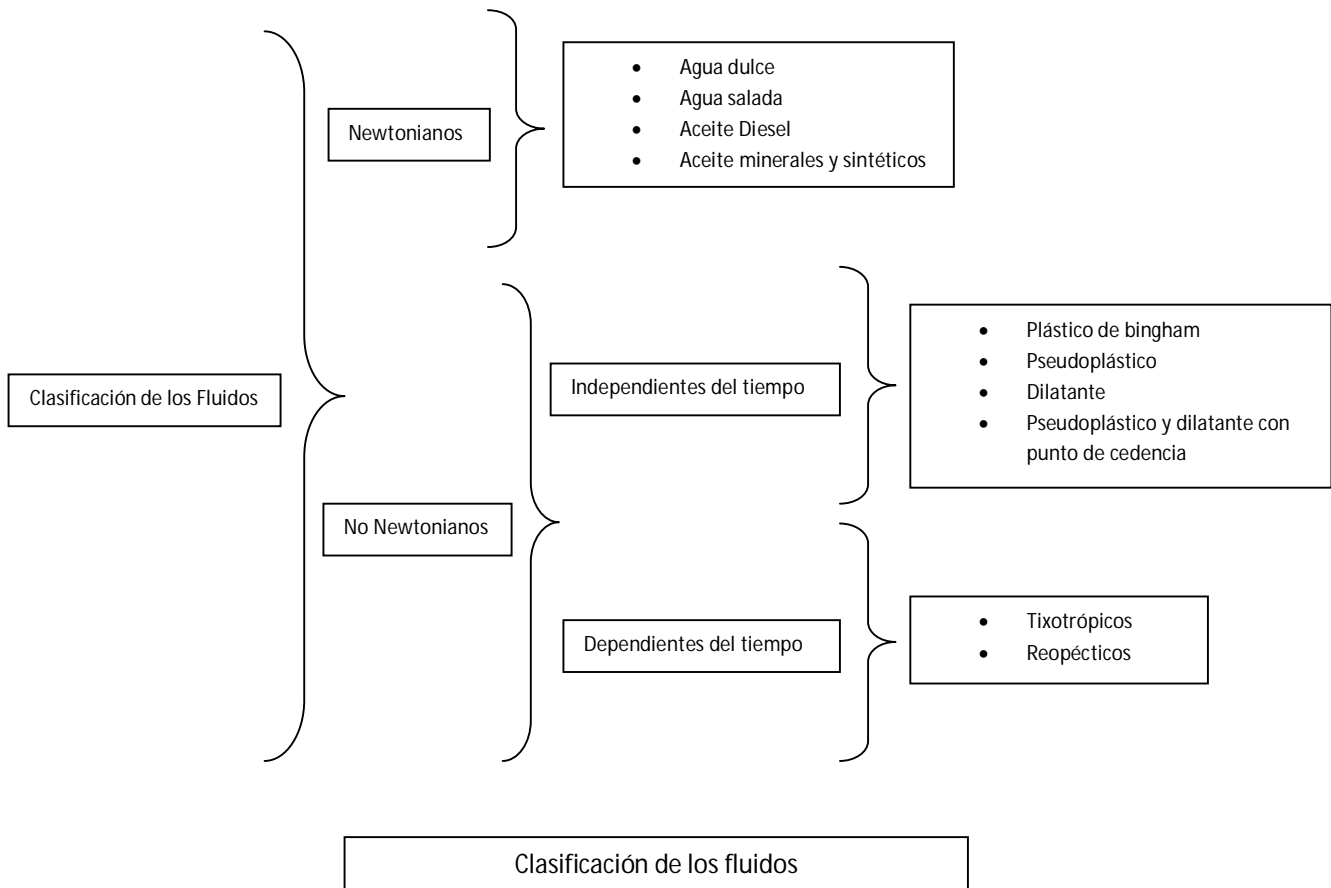
I.IV.II Propiedades reológicas

Una correcta medición de las propiedades reológicas de un fluido de perforación nos ayuda a optimizar los cálculos de pérdida de presión por fricción, para determinar la capacidad del lodo para levantar los recortes y desperdicios hasta la superficie; para analizar la contaminación del fluido por sólidos, sustancias químicas y por temperatura; así como para determinar los cambios de presión dentro del pozo durante un viaje. Las principales propiedades reológicas son la viscosidad y la resistencia gel (tixotropía).

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Analiza la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, además del impacto que estas generan sobre las características de flujo dentro de tuberías y espacios anulares.

En base a la Reología, los fluidos pueden clasificarse por el comportamiento entre la relación que presenta un fluido bajo la acción de un esfuerzo cortante y una velocidad de corte inducida por dicho esfuerzo. Esta relación es diferente para cada fluido inclusive bajo distintas condiciones de presión y temperatura la relación puede ser diferente para el mismo fluido.

En base a la relación antes mencionada, los fluidos se pueden clasificar en Newtonianos y los no Newtonianos como se puede ver en el siguiente esquema:



La **viscosidad** es el término reológico más conocido. En un sentido más amplio, la viscosidad se puede definir como la resistencia al flujo de una sustancia cuando se le aplica a esta un esfuerzo cortante.

La viscosidad se representa matemáticamente como:

$$\text{viscosidad } (\mu) = \frac{\text{esfuerzo de corte } (\tau)}{\text{velocidad de corte } (\gamma)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.1)}$$

Cuando un fluido se encuentra fluyendo, existe una fuerza en el fluido que se opone al flujo. Esta fuerza se llama *esfuerzo de corte*. Se puede describir como un esfuerzo de fricción que aparece cuando una capa de fluido se desliza por encima de otra capa. La velocidad a la cual una capa pasa por encima de la otra se conoce como *velocidad de corte*. Esto se puede ver en la fig. 1. Por lo tanto, la velocidad de corte (γ) es un gradiente de velocidad.

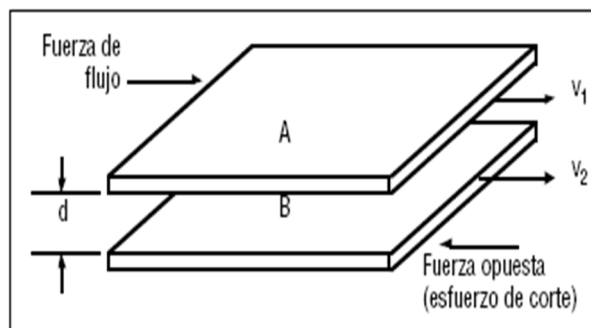


Fig. 1.1 Esfuerzo de corte y velocidad de

Para fines de cálculos de las propiedades de los fluidos de perforación es importante conocer los términos de:

Viscosidad efectiva: La viscosidad efectiva (μ_e) o también llamada en ocasiones viscosidad aparente (V_a), se considera como la viscosidad que tiene el fluido bajo ciertas condiciones específicas de velocidad de corte, presión y temperatura. Esta se obtiene mediante la lectura del un viscosímetro de lodo a 300 [rpm] (θ_{300}) o por la lectura que indica el viscosímetro a 600 [rpm] (θ_{600}) dividiéndola por dos.

Viscosidad plástica: La viscosidad plástica se describe como la parte de resistencia al flujo que es causada por la fricción mecánica. Y esta es ocasionada principalmente por:

1. La concentración de sólidos.
2. El tamaño y la forma de los sólidos.
3. La viscosidad de la fase fluida.
4. La presencia de algunos polímeros de cadena larga.
5. Las relaciones aceite-agua o sintético-agua en los fluidos de emulsión inversa.

La viscosidad plástica (V_p) se calcula a partir de los datos del viscosímetro de lodo como:

$$V_p = \theta_{600} - \theta_{300} \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.2)}$$

Punto de cedencia: Este punto representa una medida de las fuerzas electroquímicas o fuerzas de atracción que actúan en un fluido en determinadas condiciones de flujo. Estas fuerzas son el resultado de las cargas positivas y negativas ubicadas cerca de la superficie de las partículas. Este se calcula a partir de los datos del viscosímetro de lodos de la siguiente manera:

$$Y_p = 2 \cdot \theta_{300} - \theta_{600} [lb/100ft^2] \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.3)}$$

Y para hacer el cambio de unidades a Pascales multiplicar el resultado por 0.4788

La resistencia gel (tixotropía) Es una capacidad de los fluidos de perforación para realizar una transformación isotérmica reversible a un estado gelatinoso que permite suspender los sólidos mientras el pozo se encuentra estático, previniendo que los materiales densificados incluidos en los fluidos se asienten. La gelatinosidad que alcanza el fluido puede ser vuelta a un estado líquido mediante la aplicación de un esfuerzo de corte. El tiempo que tarda en formarse la gelatinosidad se conoce como rapidez gel y cuando alcanza su máxima gelatinosidad el esfuerzo que se aplica para desplazar el fluido se conoce como esfuerzo de gel.

Propiedades coloidales: Es la propiedad que tienen los lodos de perforación para poder formar un enjarre impermeable en las paredes del pozo, esto sirve para poder proteger a las formaciones porosas. La formación del enjarre depende de la calidad de las arcillas empleadas y de las sales contenidas en el agua. No es posible poder medir las propiedades coloidales de un fluido de perforación, pero es posible medir un valor relativo y así prever el comportamiento y tener control de esta propiedad.

I.IV.III pH del lodo y alcalinidad

El potencial de hidrógeno (pH) en un lodo de perforación indica su El potencial de hidrógeno (pH) en un lodo de perforación indica su acidez (pH entre 1 -7 en acidez decreciente) o alcalinidad relativa (pH entre (7 – 14 en alcalinidad creciente); Un pH de 7 es neutro. Los lodos casi siempre son alcalinos ya que el pH afecta la dispersabilidad de las arcillas, la solubilidad de varios productos y sustancias químicas, la corrosión de materiales de acero y las propiedades reológicas del lodo.

I.V MODELOS REOLÓGICOS

I.V.I Modelo Newtoniano

Un modelo reológico es una descripción de la relación entre el esfuerzo de corte que experimenta el fluido y la velocidad de corte. Para un fluido Newtoniano, la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la velocidad de corte es constante. Esta constante es la viscosidad (μ) del fluido. Así, la ecuación que describe la reología de un fluido newtoniano se puede expresar como:

$$\mu = \tau/\gamma \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.4)} \quad \text{donde:}$$

μ = viscosidad, poise (dina-seg/cm²)

τ = esfuerzo de corte (fuerza/área), dinas/cm²

γ = tasa de corte, seg⁻¹

La ecuación se denomina “ley de la viscosidad de Newton”. Todos los gases a temperatura y presión ambiente y los fluidos más sencillos (como el agua) presentan un comportamiento Newtoniano.

Los fluidos que no siguen la ley de viscosidad de Newton se denominan fluidos no Newtonianos. El comportamiento de flujo de estos fluidos es mucho más complejo que el de los Newtonianos. Para estos fluidos, la viscosidad varía con la tasa de corte. La mayoría de los fluidos de perforación son no Newtonianos y varían considerablemente en su comportamiento de flujo.

Los fluidos de perforación presentan adelgazamiento por esfuerzo cortante por esta razón, tienen una menor viscosidad a tasas de corte más altas que a tasas menores.

Un tipo de fluido con adelgazamiento por esfuerzo cortante comenzará a fluir tan pronto como se le aplique una fuerza o presión de corte. Una

tasa de corte en aumento causa la disminución progresiva de la viscosidad. Este tipo de fluido se denomina “seudoplástico”.

Otro tipo de fluido seudoplástico no comenzará a fluir hasta que se aplique un esfuerzo de corte “umbral”. Este esfuerzo se denomina “esfuerzo de cedencia”.

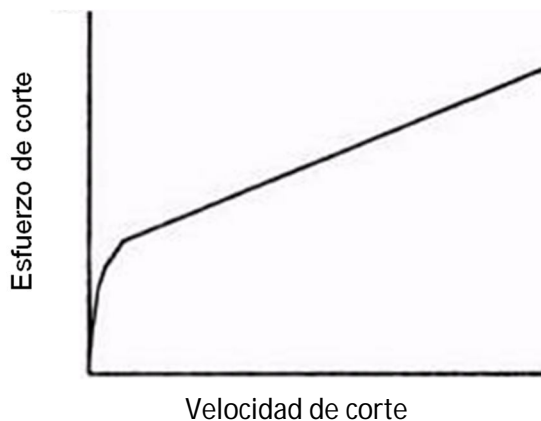


Fig. 1.2 Modelo no Newtoniano

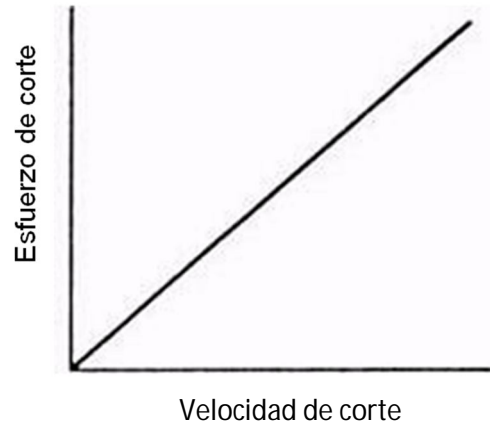


Fig. 1.3 Modelo Newtoniano

I.V.II Modelo Plástico de Bingham

Por su sencillez, el modelo reológico más utilizado para describir las propiedades reológicas de los fluidos de perforación es el modelo plástico de Bingham. Este modelo supone que el esfuerzo de corte es una función lineal de la tasa de corte, una vez que se ha excedido un esfuerzo de corte específico (el esfuerzo de corte umbral o punto cedente) y se expresa como:

$$\tau = P_c + V_p (\gamma) \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.5)} \quad \text{donde:}$$

P_c = Punto de cedencia, $lb_f / 100 ft^2$

V_p = Viscosidad plástica cp, (centipoise 1/100 poise)

Debido a que este modelo se desarrolló a partir de datos determinados entre las tasas de corte de 500 a 1000 seg^{-1} , caracteriza mejor a un fluido a tasas de corte más altas. El P_c y la V_p se calculan a partir de

datos obtenidos con un viscosímetro concéntrico convencional, a 600 y 300 [rpm].

La tasa de corte en [rpm], multiplicada por 1.702 nos da la tasa de corte en [seg⁻¹], para los reómetros convencionales utilizados en campos petroleros. Una vez que se han determinado los valores de V_p y P_c , se puede utilizar el modelo para determinar el esfuerzo de corte a cualquier tasa de corte.

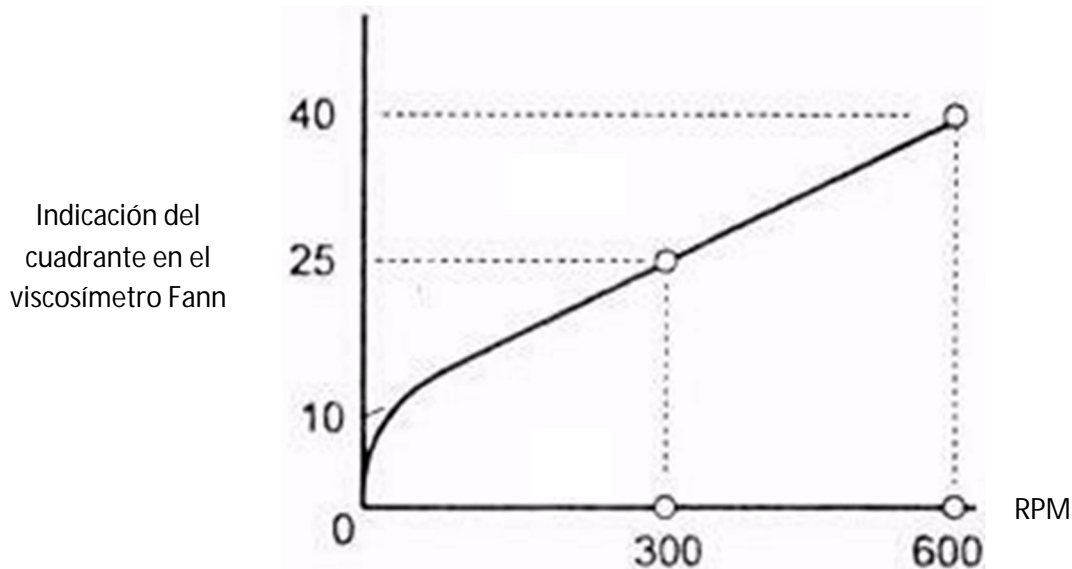


Fig. 1.4 Modelo plástico de Bingham

I.V.III Ley de Potencia

El modelo de ley de potencia describe un fluido en el cual el esfuerzo de corte graficado en función de la tasa de corte es una línea recta, cuando se utiliza papel de coordenadas doblemente logarítmicas. Debido a que se aproxima más al comportamiento de un fluido de perforación a bajas tasas de corte, en comparación con el modelo plástico de Bingham, con frecuencia se emplea para monitorear las características de suspensión y calcular la pérdida de presión del

fluido de perforación en el espacio anular. El modelo de la ley de potencias es:

$$\tau = k\gamma^n \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.6)}$$

donde:

k = índice de consistencia del fluido, poise

n = exponente de la ley de potencia, adimensional.

Los parámetros reológicos n y k se pueden calcular a partir de los puntos de datos cualesquiera de la tasa de corte/ esfuerzo cortante. Debido a que no es usual que un gráfico de coordenadas doblemente logarítmicas, todos los datos sean una línea recta, es mejor determinar n y k a las tasas de corte dentro de la sarta de perforación (n_p y k_p) y dentro del espacio anular (n_a y k_a). Se puede tener una mayor precisión si se utiliza n y k en intervalo de tasas de corte de 5 a 100 [seg⁻¹] para el espacio anular y de un intervalo de 200 a 1000 [seg⁻¹] para el interior de la tubería de perforación.

$$\text{Lectura en [rpm]} = \text{seg}^{-1} / 1.7$$

Las lecturas del cuadrante del viscosímetro para un instrumento estándar de seis velocidades se pueden emplear para determinar las constantes de la ley de potencia. La práctica usual consiste en utilizar las lecturas de 3[rpm] y 100[rpm] para la tasa baja de corte y las lecturas de 300[rpm] y de 600[rpm] para el intervalo de alta tasa de corte. Las fórmulas generales para n y k son:

$$n = \frac{\log(\tau_2/\tau_1)}{\log(\gamma_2/\gamma_1)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.7)}$$

$$k = \frac{\tau_2}{(\gamma_2)^n} \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.8)}$$

donde:

τ_2 = Lectura del esfuerzo cortante a la mayor tasa de corte.

τ_1 = Lectura del esfuerzo cortante a la menor tasa de corte.

γ_2 = Tasa de corte más alta [rpm].

γ_1 = Tasa de corte más baja [rpm].

Si se utilizan las lecturas del cuadrante del reómetro a 600 y 300 [rpm], las ecuaciones se simplifican como sigue:

$$n = 3.3 \log \left[\frac{\theta_{600}}{\theta_{300}} \right] \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.9)}$$

$$k = \frac{300}{511^n} \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.10)}$$

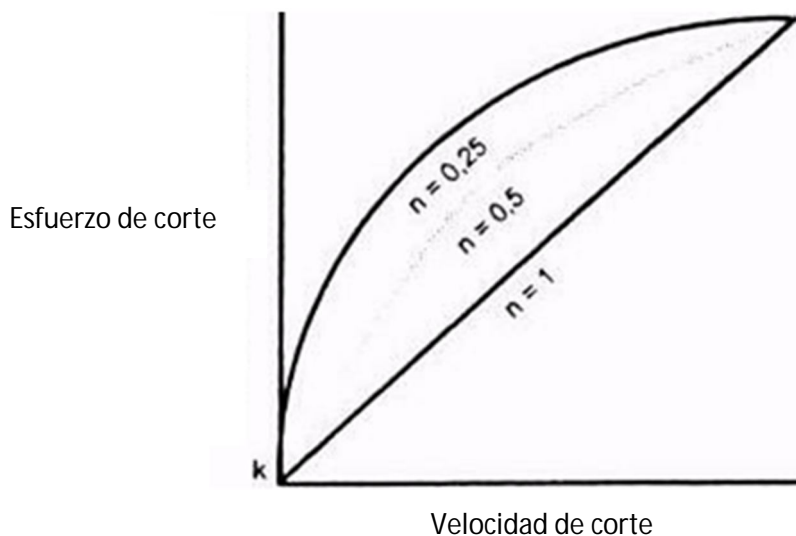


Fig. 1.5 Modelo de ley de Potencias

I.V.IV Modelo Hershel (Modelo de la Ley de Potencia Mejorado)

Este modelo combina las características de los modelos Newtonianos, plástico de Bingham y de la ley de Potencia. Es un modelo de de tres parámetros que reproduce los resultados de los tres modelos anteriores cuando se han medido los parámetros apropiados. Desafortunadamente, los tres parámetros son difíciles de derivar en base a las lecturas del reómetro. En la plática, se supone que el punto de cedencia P_c es igual a la lectura de 3 [rpm].

En base a este supuesto, se calculan n y k . La forma general de la ecuación es:

$$\tau = P_c + k\gamma^n \dots \dots \dots \text{Ecuación (1.11)}$$

donde:

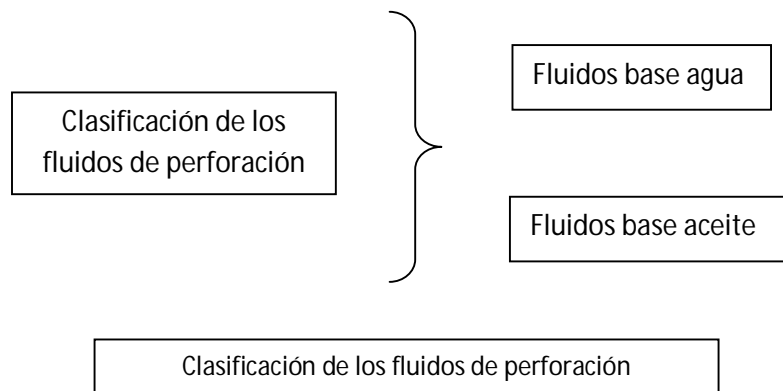
$$P_c = \theta_3, \text{ lb/ft}^2$$

$$n = (3.32) \log[(\theta_{600} - P_c) / (\theta_{300} - P_c)]$$

$$k = \theta_{300} / 511^n$$

I.VI CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

En general los fluidos de perforación pueden dividirse en dos categorías dependiendo de la fase continua que los forma:

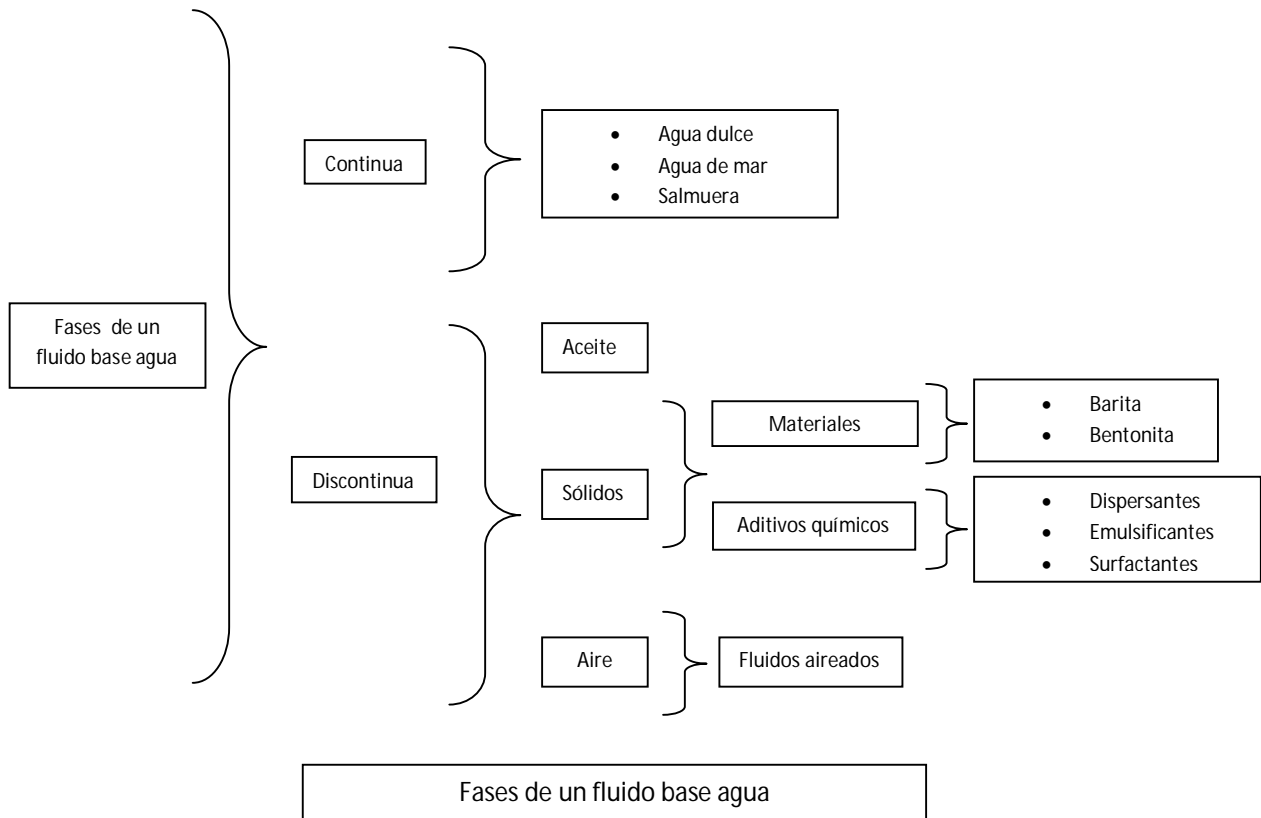


Los **fluidos base agua** son aquellos en los que su fase continua es al agua dulce, agua de mar o salmuera, y la fase discontinua puede ser aceite formando así, lo que se conoce como una emulsión directa. También la fase discontinua puede ser aire formando un lodo aireado. Se clasifican por la resistencia a los tipos de contaminantes de la formación y a sus temperaturas, por ello, se va transformando en su formulación debido a la incorporación de gases, sal, arcillas, yeso, líquidos y sólidos propios de la formación o de aditivos químicos incorporados al fluido.

Los fluidos base agua en general se pueden subdividir en:

- Agua dulce – agua de mar.
- Fluido bentonítico – (no disperso): El término no disperso indica que no se utilizan aditivos dispersantes y las arcillas comerciales agregadas al lodo, o las que se incorporan de la formación, van a encontrar su propia condición de equilibrio en el sistema de una forma natural. Este fluido es utilizado en el inicio de la perforación.
- Fluido bentonítico polimérico: Es utilizado para perforar formaciones de bajo contenido de arcilla. Se prepara con agua dulce o salada para concentraciones de calcio menores de 200 ppm.
- Fluido disperso – (no inhibido): Se utilizan dispersantes químicos para deflocular a la bentonita sódica. Es el fluido más versátil y utilizado en la industria, debido a su tolerancia a los contaminantes más comunes y a la incorporación de sólidos de formación. La viscosidad del sistema es controlada con facilidad

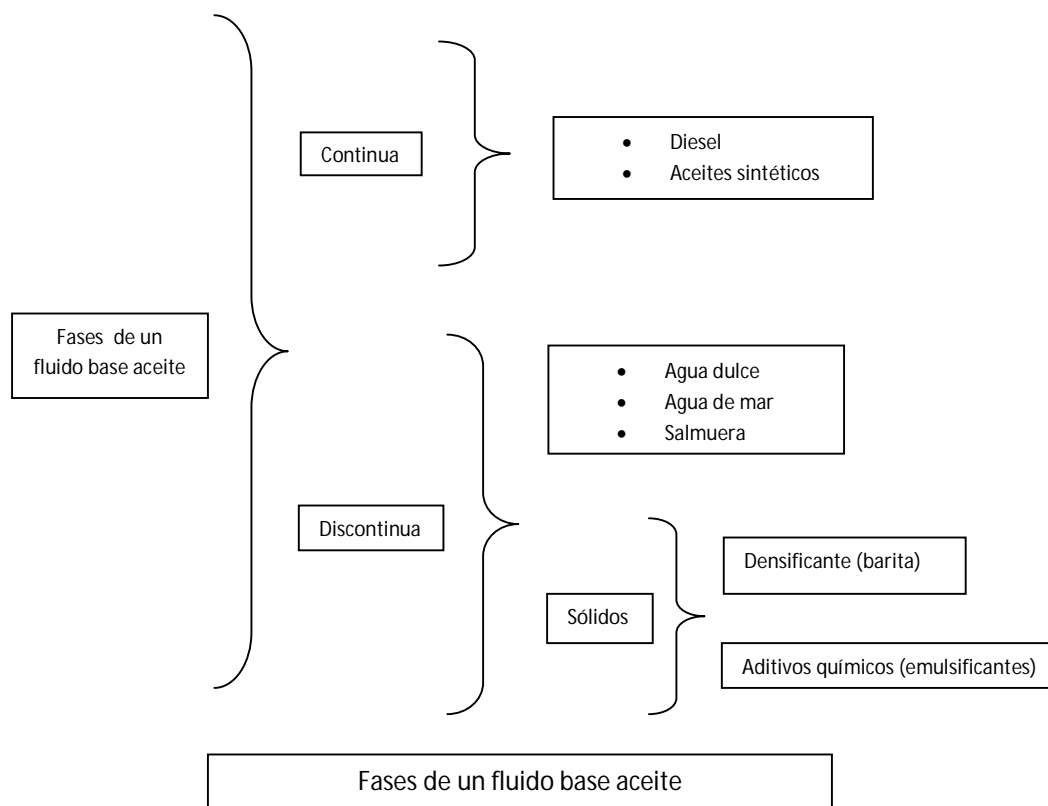
mediante el uso de dispersantes. Con la adición de lignitos es excelente para perforar formaciones con alta temperatura.



Un **lodo base aceite** es un fluido que tiene como fase continua a un aceite y su filtrado es únicamente aceite, se pueden clasificar en:

- **Emulsión inversa:** En este sistema, el contenido de agua va de un 5% a un 50% y la adición de emulsificadores solubles tanto en agua como en aceite hacen que el agua se emulsifique en el aceite y formen un sistema estable. Se utilizan para perforar lutitas hidrófilas zonas de arena productora con altas temperaturas en medios corrosivos y se caracterizan por ser lodos salados ya que salinidad varía entre 30 mil a 350 mil [ppm].

- **Emulsión directa:** Este lodo se refuerza con polímeros que soportan altas temperaturas y son utilizados como estabilizadores térmicos y reductores de filtrado, son fluidos de baja densidad y se preparan a una razón de hasta un 80% de diesel de acuerdo a la densidad requerida un 18% de agua y un 2% de emulsificantes, así como un agente supresor de hidratación y un polímero viscosificante.



Los **fluidos aireados** tienen una gran aplicación en la perforación bajo balance, ya que este método requiere que la presión hidrostática ejercida por la columna de fluido sea menor que la del yacimiento. Los fluidos aireados incluyen aire, gas, espumas o lodos aireados (que se logra mediante la inyección de nitrógeno a la columna de lodo).

Los **fluidos limpios** son los fluidos que se encuentran libres de sólidos y se utilizan principalmente en las etapas de terminación de los pozos o en alguna reparación. Las ventajas de este tipo de fluidos

como las salmueras son que disminuyen en daño a la formación pero suelen ser muy corrosivos.

CAPÍTULO II

TEORÍA DE FILTRADO Y PROPIEDADES DE FILTRADO DE LOS FLUIDOS DE PERFORACIÓN

Como se describió en el capítulo anterior, el fluido de perforación desempeña funciones muy importantes durante la perforación de un pozo petrolero. El fluido es bombeado y hecho circular dentro del pozo mediante el uso de una o más bombas dependiendo de la potencia y gasto de fluido que sea requerido. Dentro del pozo, el fluido de perforación experimenta cambios de temperatura presión y composición, que provocan que se presenten diferentes fenómenos dentro del agujero. El fenómeno que describiremos para fines de este capítulo, es el del fenómeno de filtrado.

El filtrado, se refiere a la acción mediante la cual una presión diferencial hace entrar a la fase líquida del fluido de perforación dentro de una formación permeable. Durante este proceso las partículas sólidas son filtradas formando lo que se conoce como enjarre.

Los fluidos de perforación deben estar diseñados para sellar las zonas permeables de la formación lo más rápido posible formando enjarres lisos y delgados para evitar que se genere un filtrado hacia la formación. Este fenómeno ocurre bajo condiciones estáticas y dinámicas las cuales son el objetivo de este capítulo donde se discutirán sus principios y la forma de correlacionarlos.

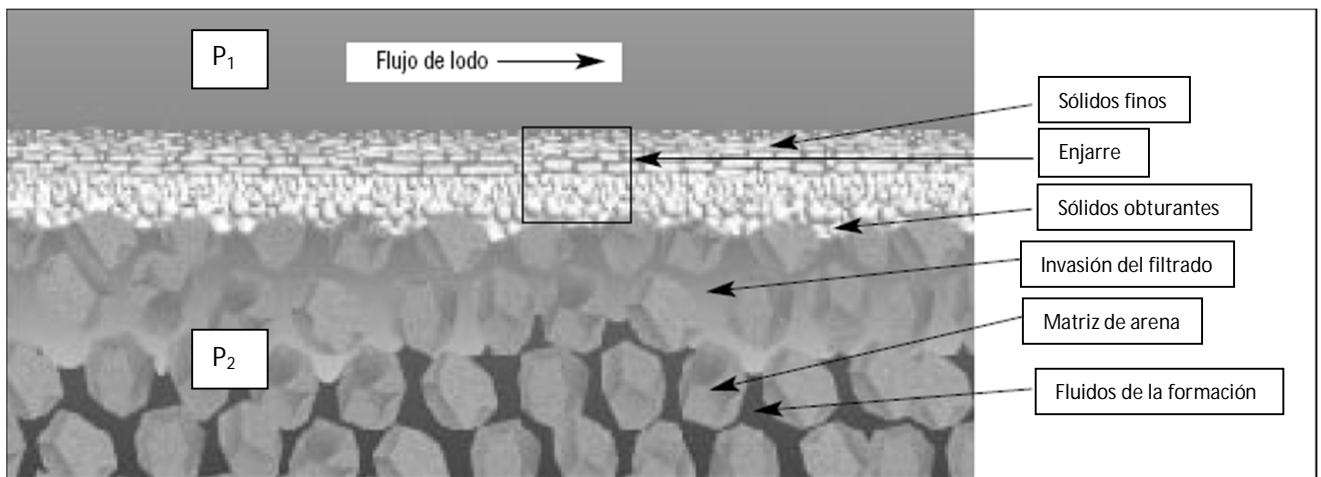


Fig. 2.1 Características del filtrado

En la figura 2.1 se observa la representación del filtrado que ocurre al interactuar el fluido de perforación con la formación fluyendo por el espacio anular. Considerando que se encuentra actuando la presión diferencial (P_1-P_2), que es la que ocasiona que se presente este fenómeno de filtración y consecuentemente la formación del enjarre.

II.I PÉRDIDA INSTANTÁNEA DE FILTRADO (SPURT LOSS)

Uno de los fenómenos más importantes cuando estudiamos el fenómeno de filtrado es el error constante o también conocido como pérdida instantánea (spurt loss), que es definido como el volumen de filtrado que de manera instantánea invade a la formación cuando se realiza la operación de perforación. Por esta razón, es muy importante conocer la tendencia del volumen de fluido que se filtrará en el medio permeable hasta que este logre obturar el medio permeable por medio de la generación de un enjarre.

Este fenómeno es en gran parte causado por la tendencia de las partículas finas del lodo que pasan a través del medio poroso de la formación, dichas partículas se van acumulando en las gargantas de los poros hasta que logran formar el enjarre que reduce de manera considerable el filtrado hacia la formación formando un sello en la pared del pozo, los diferentes tamaños y formas de las partículas contenidas en el fluido estarán definiendo la permeabilidad del enjarre además de otras variables que estudiaremos más adelante en este mismo capítulo.

En la figura 2.2 podremos observar la tendencia que se presenta cuando estudiamos el fenómeno de filtrado. En la primera etapa, podemos observar la zona del spurt loss que es la zona en donde el volumen de filtrado se encuentra incrementándose de manera significativa, es la etapa en la que las partículas contenidas en el lodo se van acumulando para dar paso a la generación del enjarre. Posteriormente se logra apreciar una declinación en el volumen de filtrado, esto a causa de la formación y consolidación del enjarre.

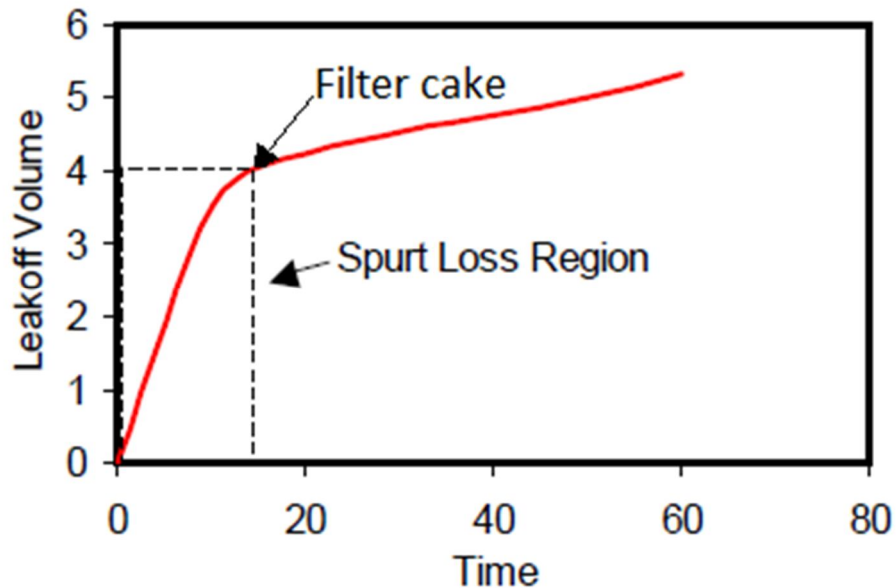


Fig. 2.2: Zona de Spurt Loss

La acumulación de las partículas bajo condiciones dinámicas es mucho más selectiva que bajo condiciones estáticas, es debido a que los espacios vacíos que deben ser obturados deben de ser del tamaño ideal para que la corriente del lodo no lo erosione. Por esta razón el enjarre que se forma bajo condiciones dinámicas es de más baja permeabilidad y porosidad que el que se generaría bajo condiciones estáticas.

Se han realizado diversos estudios para el filtrado estático y dinámico respectivamente, en los cuales, se ha llegado a la conclusión de que no existe manera de poder correlacionarlos debido a que el filtrado bajo condiciones dinámicas es afectado por la velocidad de corte, esta velocidad, altera la viscosidad del fluido de perforación y provoca que el enjarre a su vez sea erosionado. Estos parámetros son de gran influencia en el filtrado y por consiguiente serán explicados a mayor profundidad en este mismo capítulo. Dependiendo del fluido de control empleado, dependerá el tiempo en el cuál sean alcanzadas las condiciones de equilibrio. Esto se refiere que tanto la velocidad de generación del enjarre como la velocidad de erosión del mismo sean similares.

II.II FILTRACIÓN ESTÁTICA

II.II.I Teoría del filtrado estático

Consideremos un volumen unitario de una suspensión estable de sólidos donde es filtrado de manera forzada por una diferencial de presión a través de un estrato permeable; Tendremos un volumen de filtrado x , y consecuentemente tendremos un volumen de $(1-x)$ en el enjarre que será depositado en la parte superior del estrato.

Por lo tanto, si consideramos como Q_c el volumen del enjarre y Q_w el volumen del filtrado tenemos:

$$\frac{Q_c}{Q_w} = \frac{1 - x}{x} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.1)}$$

Y el espesor del enjarre ***h por unidad de área*** se expresa como:

$$h = \frac{1 - x}{x} Q_w \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.2)}$$

Como sabemos, la ecuación de Darcy se aplica al flujo de fluidos a través de medios permeables (arenas, areniscas o enjarres). Y puede ser empleada para establecer la relación entre la tasa de filtrado, la permeabilidad, superficie de sección transversal, presión diferencial, viscosidad de filtrado y espesor del enjarre. Para el flujo de filtrado a través de un enjarre, la permeabilidad de este es la determinante, ya que es más baja y por mucho que la permeabilidad de la formación.

La ley de Darcy se puede expresar de la siguiente manera.

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K\Delta P}{\mu h} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde K = a la permeabilidad en Darcies, ΔP = a la presión diferencial en atmósferas, μ = viscosidad de filtrado en centipoises, h = espesor en centímetros, t = tiempo en segundos y q = volumen de filtrado en centímetros cúbicos.

Por lo tanto, si sustituimos la ecuación (2.2) en la ecuación (2.3) obtenemos:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{K\Delta P}{\mu Q_w} \times \frac{x}{1-x} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.4)}$$

Integramos por separación de variables obteniendo:

$$Q_w^2 = \frac{2k\Delta P}{\mu} \times \frac{x}{1-x} t \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.5)}$$

Sustituimos la ecuación (2.1) en (2.5) y considerando un área de filtrado del enjarre tenemos:

$$Q_w^2 = \frac{2k\Delta P A^2}{\mu} \times \frac{Q_w}{Q_c} t \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.6)}$$

La ecuación 6, representa el fenómeno de filtrado bajo condiciones estáticas.

II.II.II Relación entre el tiempo y el volumen de filtrado

Larsen¹ encontró que si un lodo es filtrado a través de un medio poroso bajo condiciones de presión, temperatura, superficie, viscosidad y permeabilidad constantes, Q_w (el volumen de filtrado) es proporcional a \sqrt{t} .

La relación Q_w/Q_c y k en la ecuación 2.6 son constantes con respecto al tiempo. Aunque este hallazgo no es estrictamente cierto para todos los lodos³, pero si se encuentra suficientemente cerca para fines prácticos. La figura 2.3 muestra una gráfica típica del volumen acumulado de filtrado contra la raíz cuadrada del tiempo. La

intersección con el eje “y” marca lo que se conoce como el *error constante*.

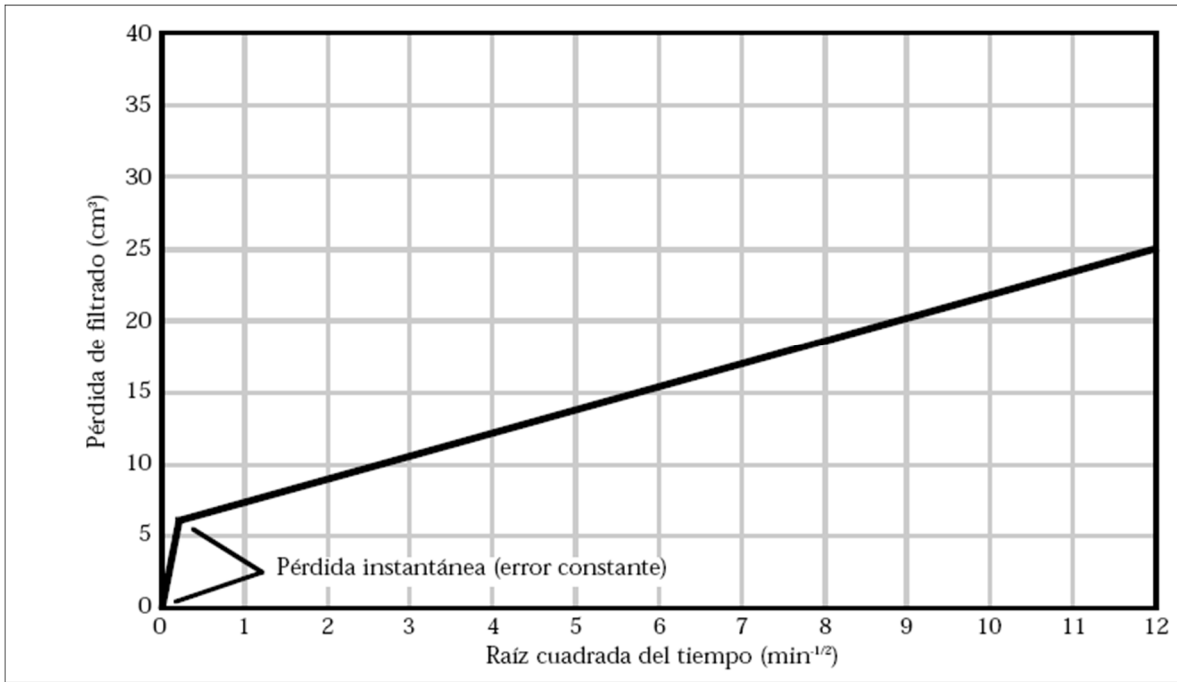


Fig. 2.3: Relación entre la pérdida de filtrado y la raíz cuadrada del tiempo

Una pérdida instantánea alta hará que la línea tenga una intersección positiva en el eje de la pérdida de filtrado “y”. Por lo tanto la intersección positiva indica simplemente que un chorro de filtrado pasó a través del medio poroso antes de que se formara el enjarre. Una baja pérdida de filtrado y una celda seca con un gran volumen retenido, causará una intersección negativa en el eje vertical.

Un experimento realizado por Larsen mostró que para una determinada presión, la ecuación 6 podía ser reescrita como:

$$Q_w - q_0 = A\sqrt{(C \times t)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.7)}$$

Donde q_0 es el error constante, y C es una constante dada por:

$$C = \frac{2kP}{\mu} \cdot \frac{Q_w}{Q_c} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.8)}$$

Así, las propiedades de filtrado para diversos lodos pueden ser evaluadas por la medición del volumen de filtrado acumulado en un tiempo estándar y bajo condiciones estándar. Las condiciones estándar recomendadas por el API² son:

Tiempo: 30 [min]

Presión: 100[psi] (6.8 atmósferas, 7[kg/cm²])

Área del enjarre: aproximadamente 7[in²] (45[cm²])

El volumen de filtrado que se acumula en 30 minutos, puede ser predicho del volumen Q_w observado al tiempo t_1 de la ecuación:

$$Q_{w_{30}} - q_0 = (Q_{w_1} - q_0) \frac{\sqrt{t_{30}}}{\sqrt{t_1}}$$

II.II.III Relación entre la presión y el volumen de filtrado

De acuerdo a la ecuación 2.6, Q_w debe ser proporcional a P . Una gráfica log-log entre Q_w contra P generaría una línea recta con pendiente de 0.5, esto asumiendo que todos los factores permanecen constantes. Pero esta condición nunca se llega a presentar, dado que la compresibilidad del enjarre varia y en consecuencia existe una variación en su permeabilidad. Pero esta relación decrece cuando se incrementa la presión. Por lo tanto:

$$Q_w \propto P^x$$

Donde el exponente χ varía de lodo a lodo, pero siempre es menor a 0.5 como se muestra en la figura 2.4.

El valor del exponente χ depende en gran parte por el tamaño y la forma de las partículas que componen el enjarre. Los enjarres de bentonita, por ejemplo, son tan compresibles que χ es cero, y Q_w es constante con respecto a la presión. La razón de este comportamiento es que la bentonita está casi toda compuesta de plaquetas finamente divididas que tienden a alinearse de forma paralela. Así la permeabilidad del enjarre es reducida en una medida mucho mayor que podría ser la del caso de un enjarre compuesto de esferas rígidas.

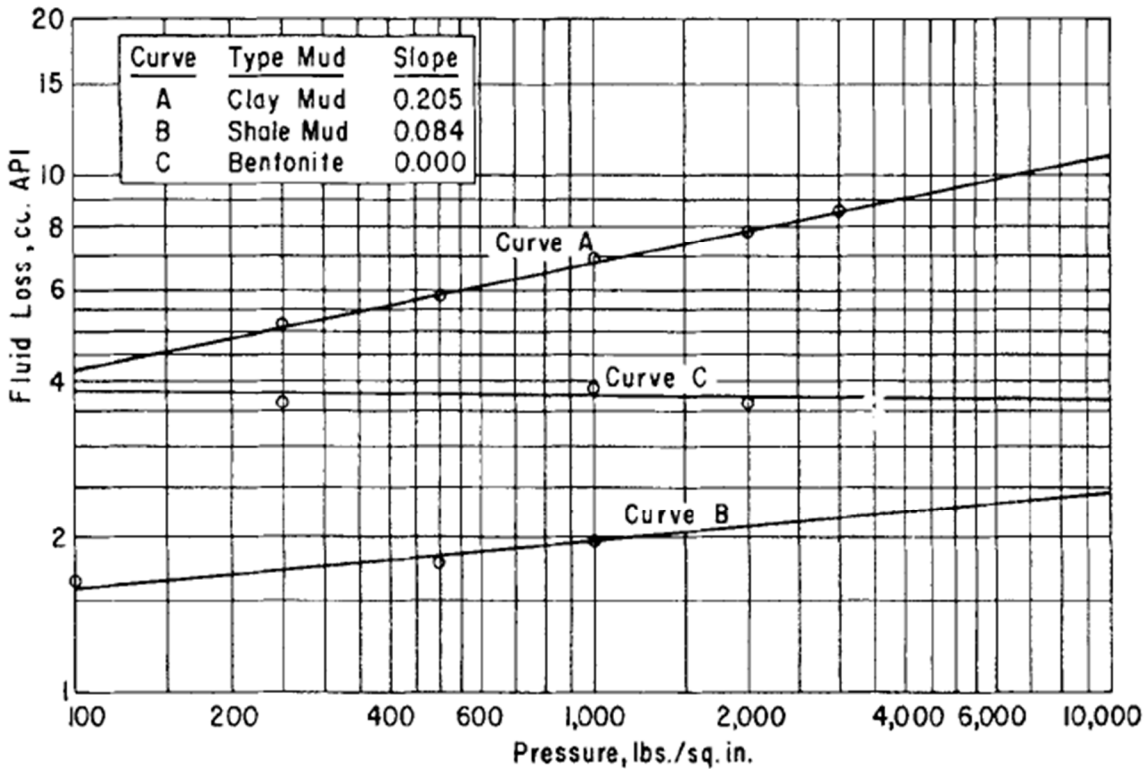


Fig. 2.4: Efecto de la presión sobre el volumen de filtrado

Outmans⁴ desarrolló una ecuación teórica que puede ser utilizada para predecir cambios en el volumen de filtrado con respecto a la presión de filtrado, esto, si la compresibilidad del enjarre es conocida. En la

práctica, por lo general, es más sencillo realizar una prueba de filtrado a la presión de interés.

En el caso de lodos base aceite, otro factor entra en juego, el incremento de la viscosidad del filtrado (usualmente aceite diesel) con aumento de la presión absoluta, que tiende a reducir la pérdida de filtrado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q_{w_1} = Q_{w_2} \sqrt{\frac{\mu_1}{\mu_2}} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.9)}$$

Donde μ_1 y μ_2 son las viscosidades a la presión de filtrado en la prueba para Q_{w_1} y Q_{w_2} respectivamente.

II.II.IV Relación entre la temperatura y el volumen de filtrado

Al incrementar la temperatura puede aumentar el volumen de filtrado en muchas maneras. En primer lugar, se reduce la viscosidad del filtrado, y por lo tanto, el volumen de filtrado aumenta de acuerdo a la ecuación 2.9. En la tabla 1 se muestran las viscosidades del agua y de 6% salmuera dentro de un rango de temperaturas. En la figura 2.5 se muestra solo la variación de la viscosidad del agua con respecto a la temperatura en un rango más amplio. Es evidente que los cambios en la temperatura pueden tener un substancial efecto sobre el volumen de filtrado esto por los cambios en la viscosidad de filtrado.

Otro efecto en los cambios en la temperatura, también pueden afectar al volumen de filtrado a través de cambios en el equilibrio electroquímico que rigen el grado de floculación y agregación, afectando la permeabilidad de filtrado en el enjarre. Como resultado de estos efectos, el volumen de filtrado puede ser más alto o más bajo que el predicho por la ecuación 2.9 pero usualmente es más alto.

Tabla 2.1. Viscosidad del agua y salmuera al 6% con cloruro de sodio a diferentes temperaturas

Temperatura [°C]	Temperatura [°F]	Viscosidad del agua [cp]	Viscosidad de la salmuera [cp]
0	32	1.792	-
10	50	1.308	-
20.2	68.4	1	1.11
30	86	0.801	0.888
40	104	0.656	0.733
60	140	0.469	0.531
80	176	0.356	0.408
100	212	0.284	-

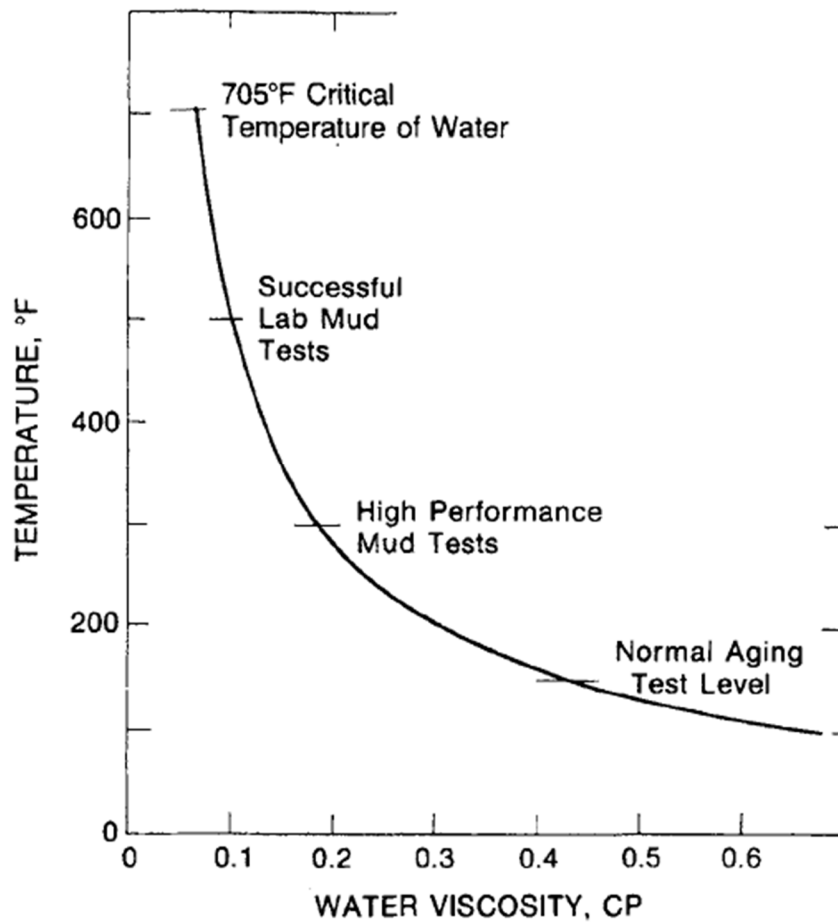


Fig. 2.5: Viscosidad del agua a diferentes temperaturas

Shremp y Johnson⁸ mostraron que no hay manera de que el filtrado perdido a alta temperatura pueda ser predicho de las mediciones realizadas a bajas temperaturas. Por lo tanto es necesario realizar la prueba a cada lodo a la temperatura de interés.

Por último la degradación química de uno o más componentes del lodo es un mecanismo que a temperaturas elevadas puede afectar las propiedades del filtrado. Muchos agentes orgánicos de control de filtrado se empiezan a degradar de manera significativa a temperaturas de alrededor de 212°F (100°C), y la velocidad de degradación se incrementa con el fomento en el incremento de la temperatura.

II.II.V Espesor del enjarre

El espesor del enjarre se supone que es proporcional al filtrado perdido, y por lo tanto, solo el filtrado necesita ser especificado. Actualmente, aunque el espesor del enjarre está relacionado con el filtrado, la relación varía de lodo a lodo, porque el valor de Q_w/Q_c en la ecuación 2.6 depende de la concentración de sólidos en el lodo y en la cantidad de agua retenida en el enjarre. El filtrado decrece con el aumento en la concentración de sólidos, pero el volumen del enjarre se ve incrementado como se muestra en la figura 2.6.

La cantidad de agua retenida en los enjarres de lodos con diferentes clases de arcillas depende de las propiedades de hinchamiento de la arcilla. La bentonita por ejemplo presenta fuertes propiedades de hinchamiento, y un enjarre bentonítico por lo tanto tiene una proporción relativamente alta de agua en los sólidos y la relación de Q_w/Q_c es baja. La tabla 2 compara el porcentaje de agua retenida en los enjarres de tres lodos con la cantidad de agua absorbida por las arcillas secas en pruebas de hinchamiento. Se observa que la cantidad de agua en los enjarres es solo ligeramente menor que en el de las arcillas hinchadas, y es prácticamente independiente del

porcentaje de sólidos en suspensión. En efecto, el porcentaje de agua en el enjarre es una medida buena de la propiedades de hinchamiento de la arcilla base.

En menor medida, el espesor del enjarre es determinado por el tamaño de la partícula y por la forma en la que están distribuidos. Estos parámetros controlan la porosidad del enjarre.

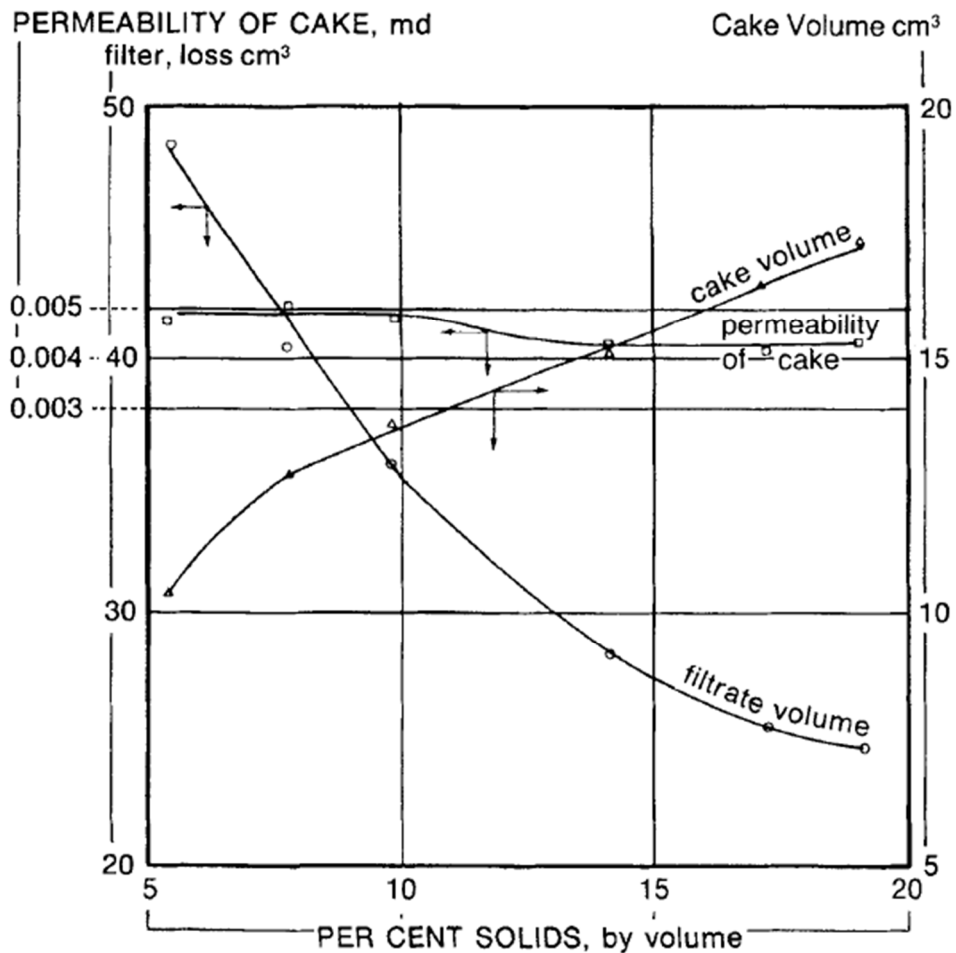


Fig. 2.6: Variación del volumen de filtrado, volumen del enjarre y permeabilidad con respecto a la concentración de sólidos en suspensión

La magnitud de estos efectos fueron mostrados por Freshwater y Scarlet⁹ quienes midieron las porosidades de los enjarres formados mediante la mezcla de nueve tamaños diferentes de esferas de vidrio. Y sus resultados pueden ser resumidos en estos dos puntos:

1.- Porosidades mínimas se obtuvieron cuando había una gradación en el tamaño de las partículas. En la figuras 2.7 y 2.8 se muestra una curva de una distribución linear del tamaño de partícula, Donde las partículas más pequeñas se comprimen de manera más densa en los poros entre las partículas más grandes.

2.- Mezclas con una amplia gama de tamaño de partículas tuvieron porosidades menores que la mezcla con una distribución del mismo tamaño de partícula.

Tabla 2.2. Correlación entre la cantidad de agua absorbida por la arcilla seca y el agua retenida en el enjarre

Tipo de arcilla	prueba de hinchamiento % de sólidos en la arcilla hinchada	Prueba de filtrado		
		% de sólidos en suspensión	100[psi] % de sólidos en el enjarre	1000[psi] % de sólidos en el enjarre
Bentonita	14.4	3.17	16.5	16.7
		4.53	15	
		6.8	15.2	
Arcilla del desierto de Mojave	62	23.4	64.5	64.5
		30.2	64.8	
		39.6	65.4	
Arcilla de oeste de Texas	40.7	24.2	45.1	53

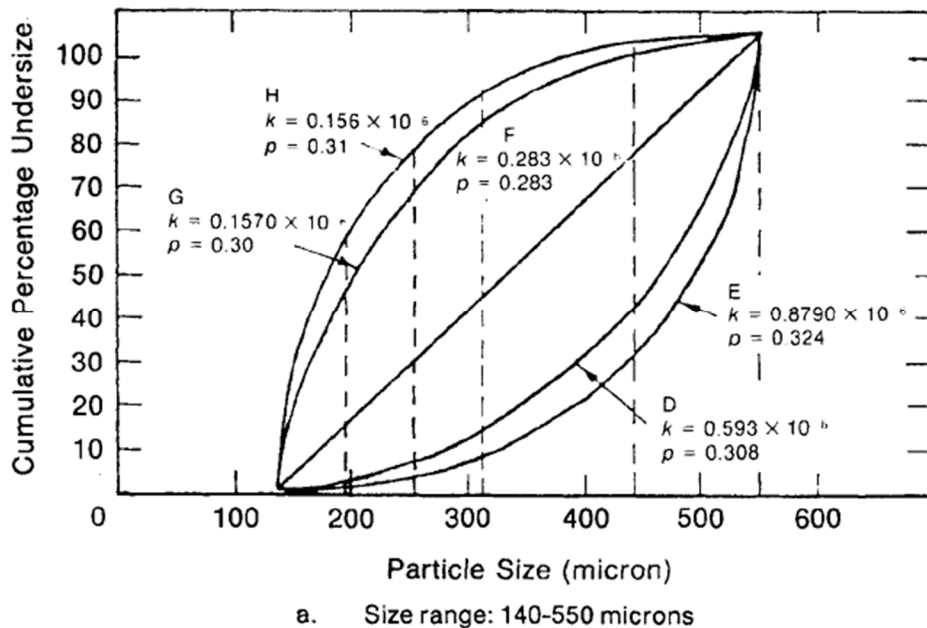
El espesor de una enjarre es difícil de medir con exactitud, en gran parte porque no es posible distinguir el límite entre el lodo y la superficie superior del enjarre. El problema surge porque el enjarre es comprimido por el arrastre hidráulico del flujo de filtrado a través de sus poros. El arrastre hidráulico se incrementa con la profundidad por debajo de la superficie del enjarre, y la presión de poro decrece en consecuencia a la presión del lodo en la superficie del enjarre a cero en el fondo del enjarre. La presión de compactación (y el esfuerzo intergranular resultante) en cualquier punto es igual a la presión del lodo menos la presión de poro, y por lo tanto es igual a cero en la capa superficial, y para la presión del lodo en la capa la capa inferior del enjarre. La distribución del esfuerzo intergranular y de densidad (expresada como porosidad) con respecto a la distancia del fondo del enjarre es mostrada en la figura 2.8 por valores teóricos y experimentales determinados por Outmans⁴ con una suspensión de carbonato de calcio. Se debe notar que en las distribuciones mostradas no cambian con el incremento del espesor del enjarre, así la porosidad promedio del enjarre se mantiene constante con respecto al tiempo.

Cuando los valores precisos del espesor del enjarre en condiciones estáticas son requeridos es aconsejable utilizar el método desarrollado por Engelhardt y Schindewolf³, que es el siguiente: Una cantidad de lodo es colocado en la celda de filtrado, y la filtración es detenida al momento en que se consume todo el lodo de manera que solo en enjarre permanece en la celda. El momento crítico para detener el filtrado es determinado por la observación del volumen de filtrado en pequeños intervalos de tiempo, y al mismo tiempo graficar el volumen contra la raíz cuadrada de los intervalos de tiempo. La filtración es detenida inmediatamente cuando la curva se aparta de la linealidad. El volumen total de lodo filtrado es calculado del peso combinado del filtrado del enjarre dividido por la densidad original del lodo. El volumen del enjarre es posteriormente obtenido por la substracción del volumen filtrado del volumen del lodo filtrado.

II.II.VI La permeabilidad del enjarre

La permeabilidad del enjarre es un parámetro fundamental que controla la filtración estática y dinámica. Es un parámetro para la evaluación de las propiedades de filtrado en lodos con diferente concentración de sólidos, tiene la ventaja sobre el volumen de filtrado en ser independiente de la concentración de sólidos, como se muestra en la figura 2.6 (el ligero aumento de la permeabilidad a baja concentración de sólidos mostrado en la figura 6 es probablemente a la configuración de las partículas más gruesas). Además el enjarre provee información útil sobre las condiciones electroquímicas predominantes en el lodo.

Las permeabilidades del enjarre se midieron durante las primeras investigaciones del comportamiento de filtrado. Williams y Cannon¹⁰ obtuvieron valores entre 0.2 y $.6 \times 10^{-3}$ [md] a 8 atm de presión para lodos de la costa del golfo, y 72×10^{-3} [md] para un lodo del oeste de Texas.



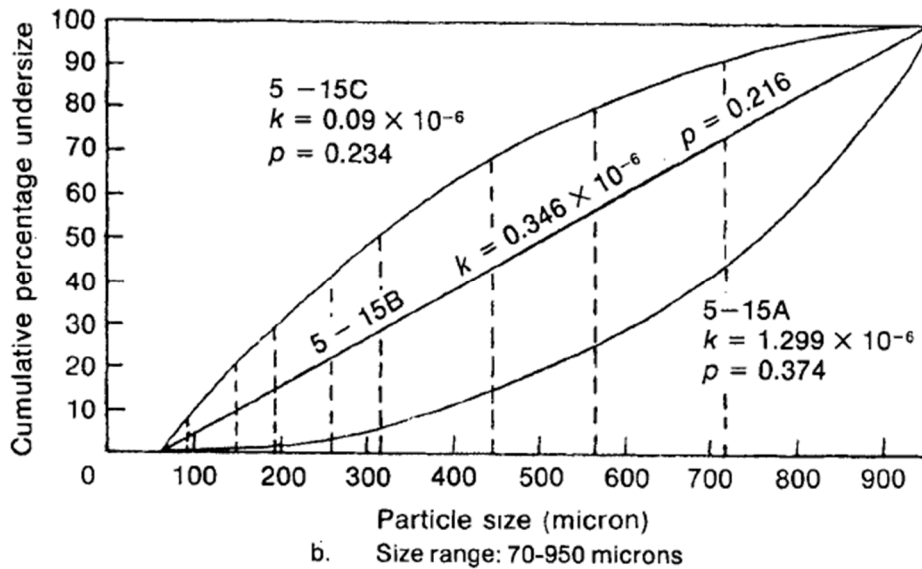


Fig. 2.7: Permeabilidades y porosidades de enjarres de esferas de vidrio K=permeabilidad en darcies P=porosidad, Freshwater, y Scarlett.

Gates y Bowie¹² mencionaron la dificultad de medir el espesor del enjarre con exactitud. Este problema puede ser evitado mediante el uso del método de Von Engelhardt y Schindewolde³ descrito anteriormente, para determinar el volumen del enjarre, Posteriormente para el cálculo de la permeabilidad se emplea la ecuación 2.6 reordenada como:

$$k = Q_w Q_c \frac{\mu}{2tPA^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.10)}$$

Donde Q_w y Q_c son expresados en $[\text{cm}^3]$, t en [seg], P en [atmósferas], A en $[\text{cm}^2]$, μ en centipoises, La ecuación 2.10 se convierte entonces con las pruebas estándar API en:

$$k = Q_w Q_c \mu \times 1.99 \times 10^{-3} [\text{mD}] \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.11)}$$

Este método es adecuado para estudios de filtrado estático en el laboratorio. En el pozo, donde la precisión no es tan importante, es más conveniente medir el enjarre manualmente y usar la ecuación 2.6 en la forma:

$$K = \frac{Q_w h \mu}{2tPA}$$

Si h es expresada en milímetros

$$K = Q_w h \mu \times 8.95 \times 10^{-3} [md] \dots \dots \dots (2.12)$$

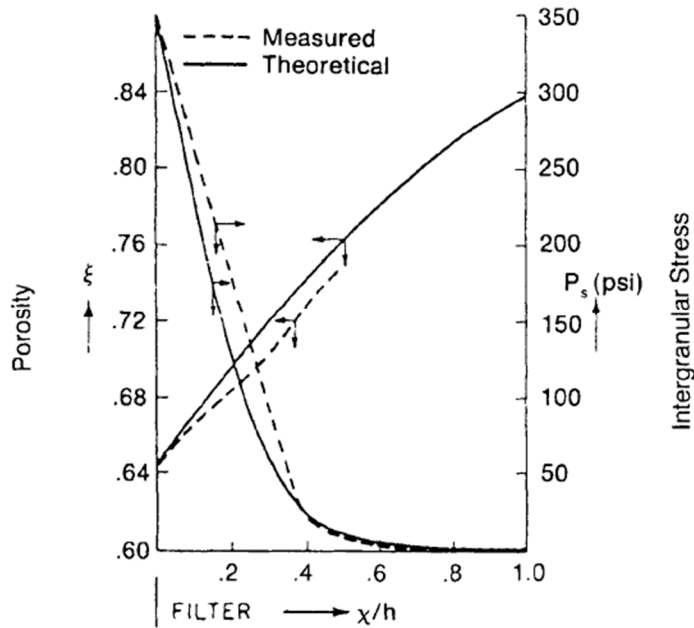


Fig. 2.8: Distribución de porosidad (ξ) y esfuerzo efectivo (P_s) en un enjarre de una suspensión de tiza. Presión de filtrado=350[psi]

II.II.VII Efecto del tamaño y forma de la partícula sobre la permeabilidad del enjarre

Krumbein y Monk¹³ realizaron una investigación en las permeabilidades en enjarres de arenas de río, mediante la separación de la arena en diez fracciones de tamaño, estas las recombinaron para obtener dos tipos de mezclas. En una de ellas, se presentaba un promedio mayor de los diámetros de las partículas, pero todas tenían

el mismo rango en el tamaño de las partículas, que fueron definidos en términos de un parámetro phi como muestra la figura 2.9. En el otro grupo, todas las mezclas tenían el mismo promedio de diámetro de partícula, pero una gama más amplia en el rango del tamaño de partícula. Los resultados mostraron que la permeabilidad del enjarre (1) decreció con el diámetro promedio de la partícula, y (2) con el ancho mayor en el rango del tamaño de la partícula (ver la figura 2.10).

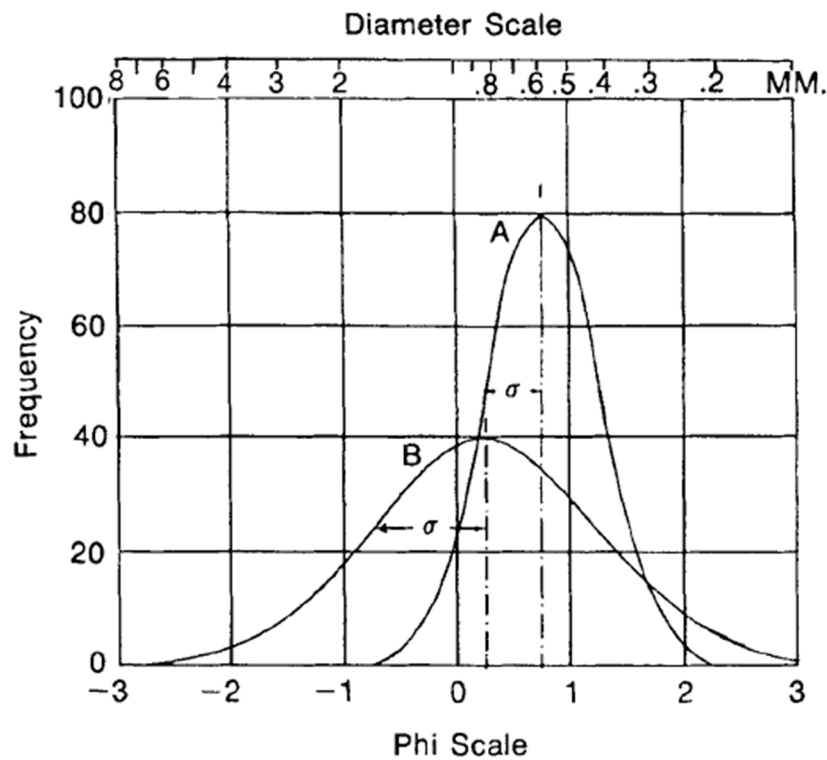


Fig. 2.9: Ejemplo de una curva estrecha A y una curva ancha B de rango de partícula contra la escala phi.

Se podría esperar una permeabilidad mínima en el enjarre con una graduación del tamaño de las partículas. Sin embargo, los experimentos mostraron que las permeabilidades menores son obtenidas cuando existe un exceso de partículas en el extremo fino de la escala, y no cuando las curvas de distribución del tamaño son lineares (ver la figura 2.7 a y b). Esto podría parecer que una

graduación uniforme en el tamaño de partícula es quizás de menor importancia.

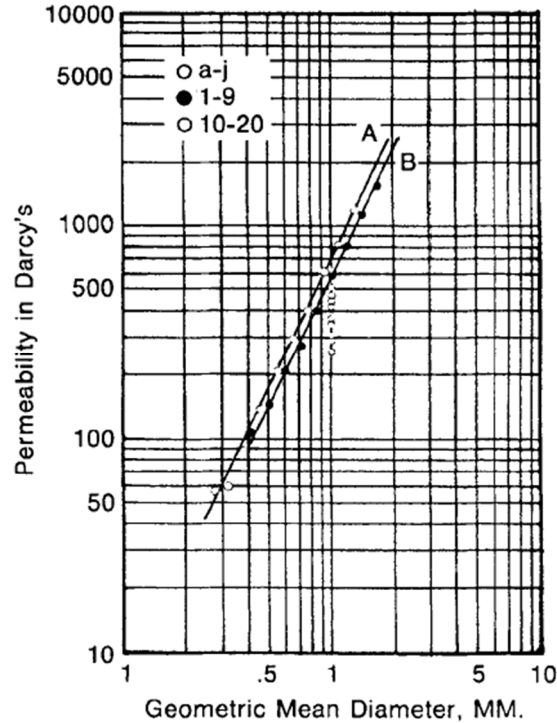


Fig. 2.10: Variación de permeabilidad del enjarre con el promedio de diámetro y rango en el tamaño de las partículas.

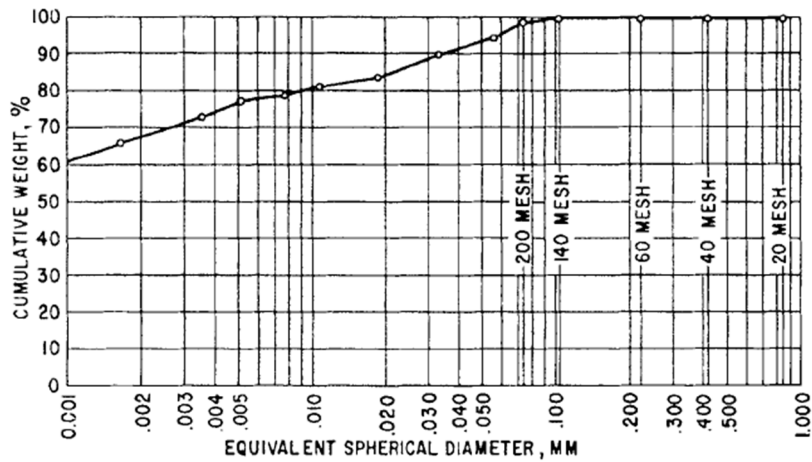
Curva A=Fracción individual de tamaño Curva B=Mezcla e fracciones, todas tienen el mismo rango de tamaño pero se incrementa el diámetro

Pequeños círculos verticales= mezcla de fracciones, todos tiene la misma media de diámetro. La permeabilidad decrece con el incremento en el rango en el tamaño

Los fluidos de perforación contienen cantidades sustanciales de coloides, cuyo tamaño puede tener variaciones de al menos 10^{-5} micrones. No es de extrañar que las permeabilidades de sus enjarres dependieron de la proporción y propiedades de las fracción coloidal. Aunque los datos obtenidos mostraron solo una correlación general entre el tamaño de la partícula y la permeabilidad del enjarre, porque no se tenía en cuenta diferentes grados de floculación, el grupo de lodos con la mayor fracción coloidal (ver la figura 2.11a) tuvo permeabilidades en el enjarre en el rango de 1.5 a 0.31×10^{-3} [md].

Mientras el grupo de lodos sin coloides (ver la figura 2.11b) tuvo permeabilidades tan altas que ni siquiera pudieron ser medidas.

La permeabilidad en el enjarre es, por supuesto influenciada por el tipo de coloide, cantidad y tamaño de la partícula. Por ejemplo los enjarres de bentonita, tiene bajas permeabilidades porque son planos, por su particularidad en la forma de las plaquetas que permiten realizar un buen empaque en la dirección de flujo.



La imagen superior A presentó una velocidad de filtrado menor a 20[cm³/hr]
 La imagen inferior B presentó una velocidad de filtrado mayor a 115[cm³/hr]

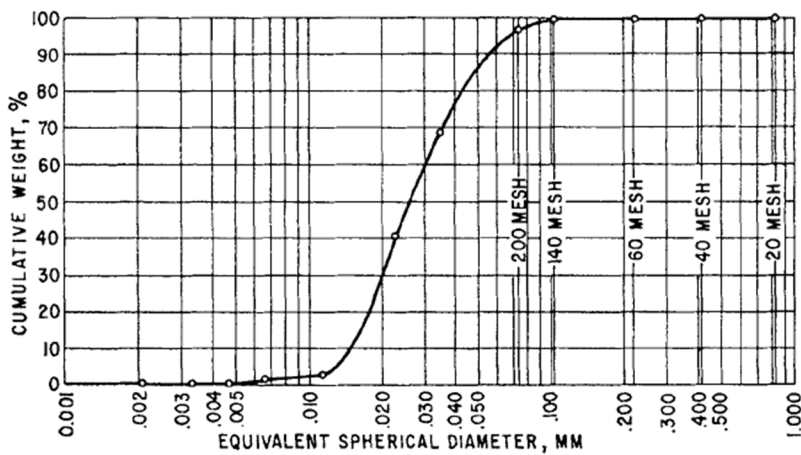


Fig. 2.11: Distribución de tamaño de partícula de lodos seleccionados.

II.II.VIII Efecto de la floculación y acumulación sobre la permeabilidad del enjarre

La floculación en los lodos hace que las partículas se asocien de manera dispersa. Esta estructura persiste de manera limitada en los enjarres, causando considerables incrementos en la permeabilidad. Cuanto más alta es la presión de filtrado, más se aplana la estructura, por lo que la porosidad y la permeabilidad decrece cuando se incrementa la presión. Cuanto mayor sea el grado de floculación y las fuerzas de atracción entre las partículas será más fuerte la estructura y por lo tanto será más resistente a la presión (ver la figura 2.12). La estructura es aún más fuerte si la floculación es acompañada por la acumulación, porque así, tendrá mayor espesor. Por ejemplo la suspensión 1 de la figura 2.12 contiene solo 0.4 gramos por litro de cloruro en el filtrado, suficiente solo para causar una estructura de floculación débil. La suspensión 2 fue obtenida adicionando 35 gramos por litro de cloruro de sodio a la suspensión 1, suficiente para causar una fuerte floculación además de estar acompañada por la acumulación. Consecuentemente la porosidad y permeabilidad del enjarre de la suspensión 2 fue considerablemente mayor que el de la suspensión 1, inclusive con altas presiones de filtrado.

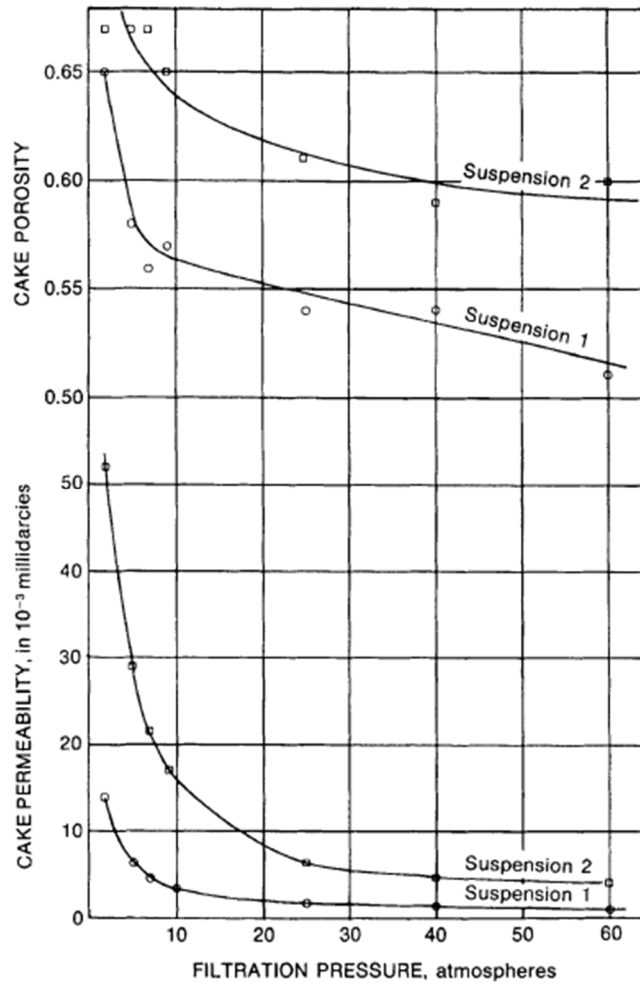


Fig. 2.12: Reducción de la porosidad y permeabilidad del enjarre con el aumento de la presión de filtrado tiempo de filtrado 60[min].

II.II.IX El proceso de construcción del enjarre.

Como ya se ha mencionado, existe una pérdida instantánea al comienzo de una prueba de filtrado, el volumen de filtrado llega a ser proporcional a la raíz cuadrada del intervalo del tiempo. En el pozo en perforación, la pérdida instantánea puede ser mucho mayor cuando el filtrado toma lugar en rocas más permeables: De hecho puede llegar a ser infinito (pérdida de circulación) al menos que de que el lodo contenga partículas del tamaño requerido para obturar los poros de la roca, y establecer así una base en donde un enjarre pueda llegarse a

formar. Solo las partículas con un cierto tamaño pueden llegar a obturar los poros. Partículas mayores al tamaño de poro no podrán entrar a estos y son arrastrados por la corriente del lodo; Las partículas considerablemente pequeñas al tamaño de poro invaden la formación sin obstáculos; pero las partículas con un tamaño certero se adhieren a los cuellos de botella dentro de los canales formando un empaque obturando los poros dentro de la superficie. Una vez que se establece el sello primario, sucesivamente partículas más pequeñas hasta los coloides finos estarán colaborando en el sello, y posteriormente solo el filtrado invadirá la formación.

El tiempo en que se presenta la pérdida instantánea es muy breve. Como resultado del proceso antes mencionado son definidas tres zonas en donde las partículas del lodo son establecidas sobre una formación permeable (ver la figura 2.13).

1. Enjarre exterior sobre las paredes del pozo.
2. Enjarre interior, se extiende un par de diámetros de grano en la formación.
3. Zona invadida por partículas finas durante la pérdida instantánea, normalmente se extiende alrededor de una pulgada dentro de la formación. Resultados experimentales realizados por Krueger y Vogel sugieren que estas partículas finas inicialmente no causan un deterioro de la permeabilidad, pero puede hacerlo después de que el filtrado se ha llevado a cabo por algunas horas, probablemente debido a la migración y consecuentemente al bloqueo de los poros.

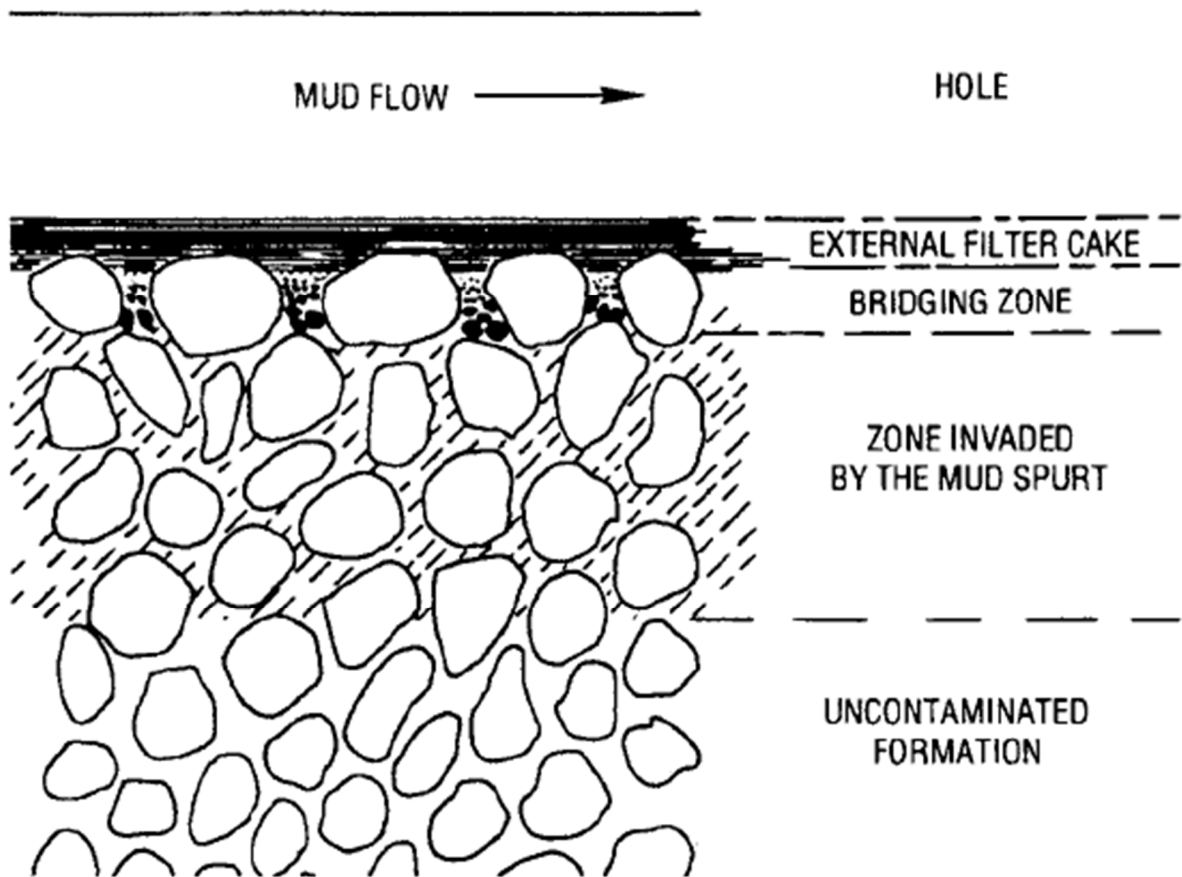


Fig. 2.13: Invasión de una zona permeable por sólidos del

En la tabla 3 se muestra los resultados experimentales realizados por Beeson y Wright²¹, en esta tabla se puede notar que la diferencia entre la pérdida bruta en el papel y en el medio poroso, fue mayor con la arena no consolidada que en las rocas consolidadas, inclusive cuando la permeabilidad de estos últimos fue mayor. También se pueden observar que las diferencias entre la pérdida neta de filtrado sobre el papel y sobre el aumento de los medios porosos con el incremento en la pérdida instantánea.

Tabla 2.3. Efecto del medio de filtrado sobre la pérdida instantánea

Efecto por tipo de lodo	Medio de filtrado			
	Prueba API Whatman Papel filtro 50	Arena sin consolidar 219[md] a 299[md]	Roca consolidada 520[md]	Roca consolidada 90[md]
Bentonita 1.04 SG:				
Pérdida bruta de filtrado	11.5	53	23.4	15.3
Pérdida instantánea	**	29	5.6	3
Pérdida neta de filtrado	11.5	24	17.8	12.3
Arcilla nativa 1.15 SG:				
Pérdida bruta de filtrado	11.5	17		
Pérdida instantánea	**	6		
Pérdida neta de filtrado	11.5	11		
Base aceite 0.93 SG:				
Pérdida bruta de filtrado	0	12.3		
Pérdida instantánea	0	9.6		
Pérdida neta de filtrado	0	2.7		

Abrams¹⁹ mostró que partículas cuyo diámetro medio eran alrededor de una tercera parte del tamaño medio de poro de una arenisca de 5 darcies estas partículas podrían obturar la roca y dar un sello. A fin de formar una base efectiva para el enjarre, un lodo por lo tanto debe contener partículas que van en su tamaño un poco menor al tamaño de poro en la formación que será perforada.

Además, debe haber partículas de tamaño coloidal, para obturar poros pequeños de la formación. La mejor manera de determinar el tamaño de las partículas de obturación primaria es haciendo una prueba de ensayo y error con núcleos de la formación de interés. Para resumir, fue encontrado que partículas menores a 2 micrones de diámetro podrían obturar rocas con una permeabilidad menor a 100[md]; partículas de 10 micrones podrían obturar rocas consolidadas con permeabilidades entre 100 y 1000 [md]; y partículas de 74 micrones

(malla de 200) podrían obturar arenas con permeabilidades arriba de 10 Darcies.

II.III Filtración Dinámica

Bajo la condición de filtración dinámica, el crecimiento del enjarre se encuentra limitada por la acción erosiva del flujo del lodo. Cuando la superficie de la roca es lo primero que se expone, la velocidad de filtrado es muy alta y el enjarre crece rápidamente. Sin embargo la velocidad de crecimiento decrece conforme pasa el tiempo hasta que finalmente se equilibra y este es igual a la velocidad de erosión; A partir de entonces el espesor del enjarre es constante. Bajo las condiciones dinámicas de equilibrio, la velocidad de filtrado depende del espesor y permeabilidad del enjarre y éste fenómeno es gobernado por la ley de Darcy expresada anteriormente en la ecuación 3. Mientras que bajo las condiciones estáticas, el espesor del enjarre se incrementa indefinidamente, y la velocidad de filtrado es gobernada por la ecuación 2.6.

El enjarre bajo condiciones dinámicas difiere del enjarre en condiciones estáticas en que la superficie del enjarre es débil o floja no se presenta bajo condiciones dinámicas, porque esta es erosionada en una medida que depende del esfuerzo cortante ejercido por las fuerzas hidrodinámicas al fluir el lodo.

Las diferentes etapas de la filtración dinámica son mostradas en la figura 2.14. Observamos que de T_0 a T_1 , la velocidad de filtrado decrece y el espesor del enjarre se incrementa. De T_1 a T_2 el espesor del enjarre se mantiene constante, pero la velocidad de filtrado continua decreciendo, porque de acuerdo con Outmans⁴ el enjarre

continua compactándose. (Probablemente porque, la velocidad de depositación iguala a la velocidad de compactación). Al tiempo T_2 , las condiciones de equilibrio son alcanzadas y tanto la velocidad de filtrado como el espesor del enjarre permanecen constantes. La velocidad de filtrado es la dada por la ecuación 2.13.

$$Q = \frac{k_1 \left(\frac{\tau}{f}\right)^{-v+1}}{\mu \delta (-v + 1)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.13)}$$

Donde k_1 es la permeabilidad del enjarre a 1 [atmósfera] de presión, τ es el esfuerzo de corte ejercido por la circulación del lodo, f es el coeficiente de fricción en la capa superior del enjarre, δ es el espesor del enjarre sujeto a la erosión, y $(-v + 1)$ es una función de la compresibilidad del enjarre.

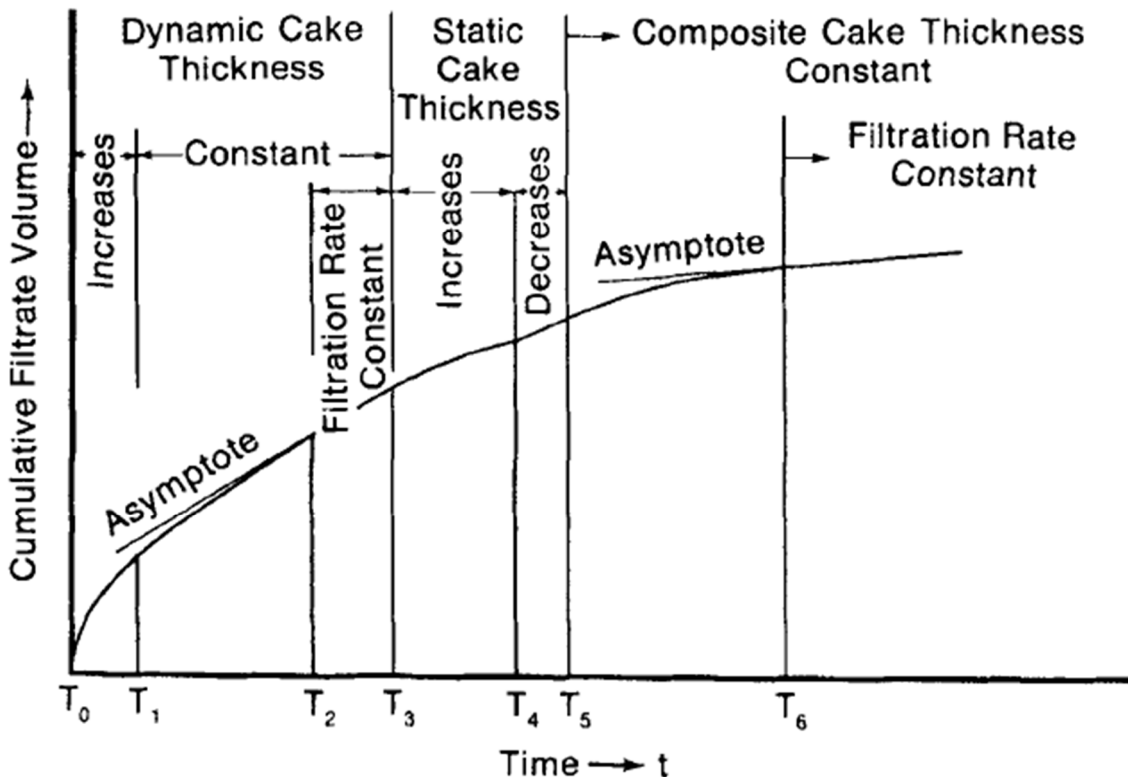


Fig. 2.14: Filtrado relativo estático y relativo dentro del pozo

Prokop²³ midió velocidades dinámicas de filtrado en pruebas de laboratorio, en donde el lodo fluía a través un agujero concéntrico en un núcleo cilíndrico artificial. La tabla 2.4 muestra los espesores de los enjarres cuando se alcanza el equilibrio para un diferentes lodos de laboratorio.

Tabla 2.4. Espesor de los enjarres al alcanzar el equilibrio bajo condiciones dinámicas de filtrado.

Base del lodo (Todos los lodos tratados con cal, sosa cáustica y quebracho)	Pérdida de filtrado API (cc en 30[min])	Equilibrio en el espesor del enjarre		Velocidad de equilibrio del lodo	
		(in)	(mm)	(ft/min)	(m/min)
Bentonítico	19	1/32	0.8	125	38
Bentonita de calcio y barita	8	3/32	2.4	48	15
Bentonita de calcio	10	6/32	4.7	72	22
Attapulgite y bentonita	148	21/32	16.6	530	161

El lodo circuló a través de un agujero de 2[in] de diámetro en arena consolidada. Flujo turbulento, presión de filtrado de 350[psi].

Ferguson y Klotz²⁴ obtuvieron datos excelentes de las velocidades de filtrado dinámico en un modelo de pozo donde duplicaron la geometría del campo. Agujeros donde perforaron en bloques de arenisca artificial con barrenas de 5(1/4) de [pg.] y 5 (3/8) de [pg.]. De la figura 2.15 a la 2.18 se muestra el cambio en las velocidades de filtrado dinámico con respecto al tiempo para cuatro tipos de lodos a varias velocidades de circulación. Se puede observar que las velocidades dinámicas fueron considerablemente mayores que la de las velocidades estáticas como el de las pruebas de pérdida de filtrado API. También se observa que el tiempo para llegar a que el filtrado dinámico fuera constante transcurrió de 2 a cerca de 25[hrs] dependiendo del tipo de lodo y de

la velocidad de flujo. En la figura 2.19 se muestra el incremento de la velocidad de filtrado con respecto al incremento de la velocidad de flujo. El filtrado API ha sido marcado por curvas para cada lodo empleado, para mostrar la falta de correlación con la velocidad dinámica.

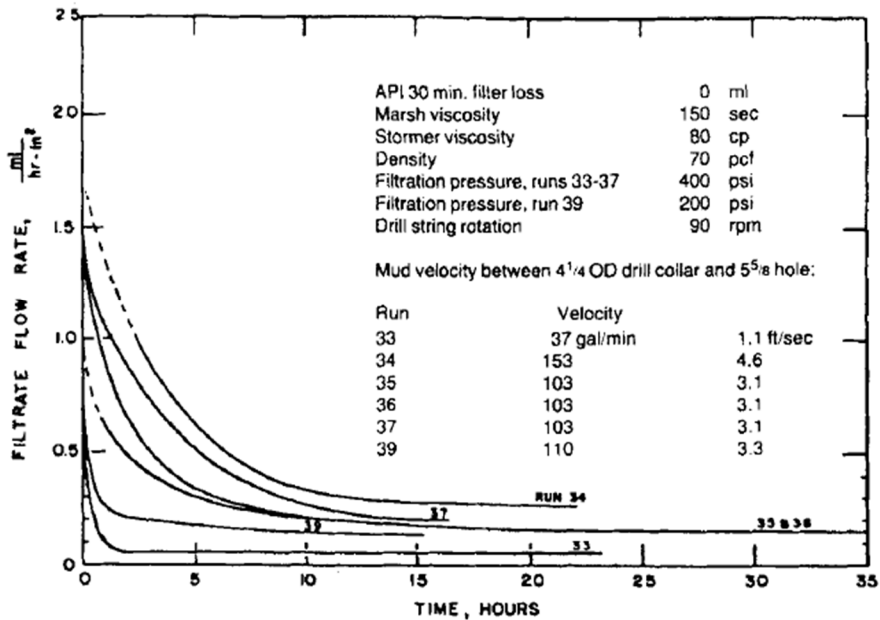
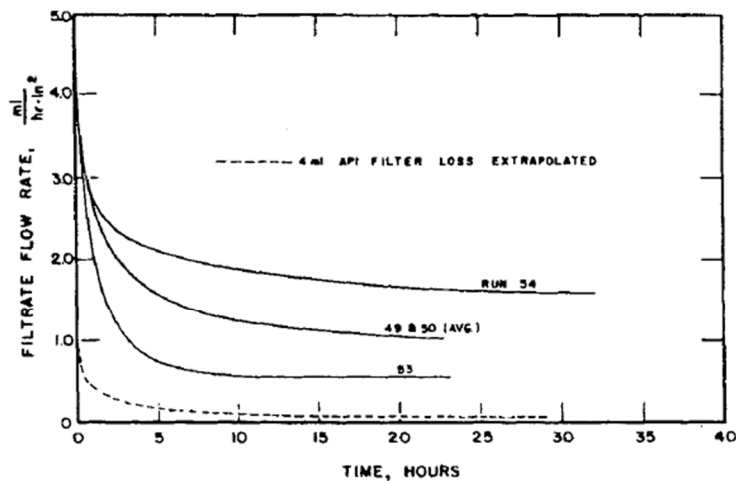


Fig. 2.15: Filtrado dinámico para un lodo base aceite



Average properties:		Filtration pressure 400 psi; drill string rotation 90 rpm; Mud velocity between 4 1/4 OD drill collar and 5 1/2 hole:		
API 30 min. water loss	4 ml	Run	Velocity	
Marsh Viscosity	45 sec	49 and 50	149 gal/min	5.0 ft/sec
Stormer Viscosity	17 cp	53	62.5	2.1
Density	70 pcf	54	286	9.6

Fig. 2.16: Filtrado dinámico para un lodo de emulsión inversa

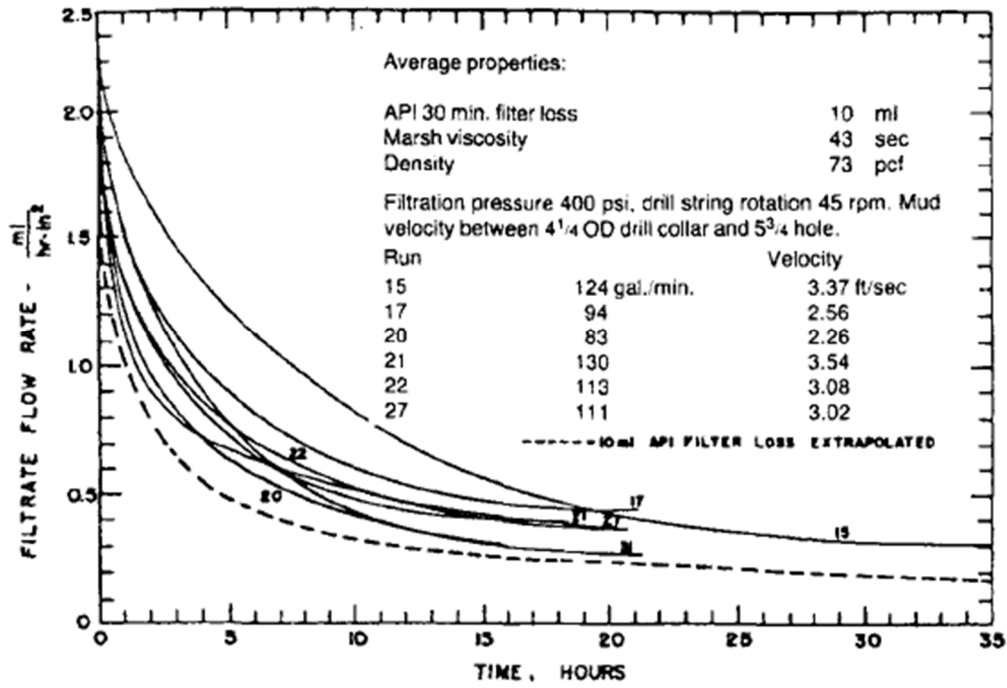
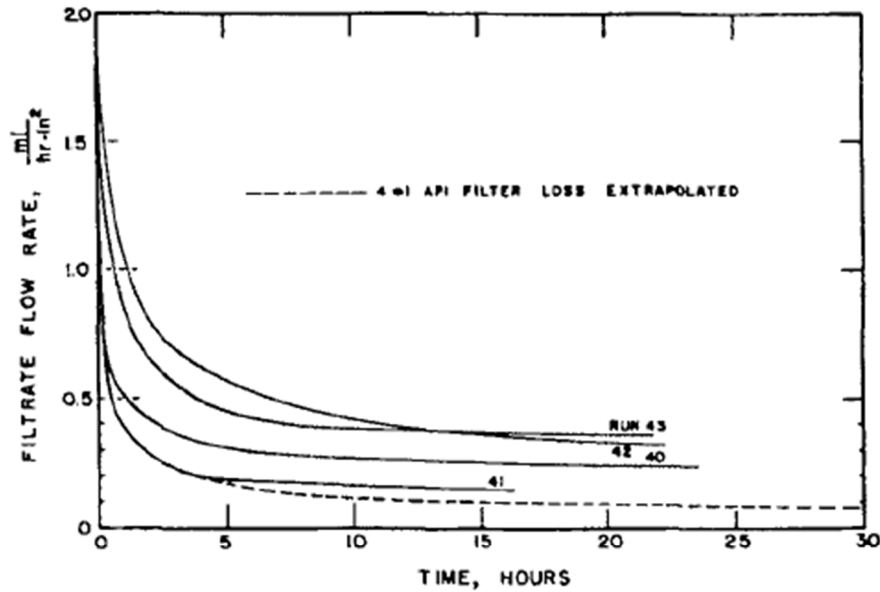


Fig. 2.17: Filtrado dinámico para un lodo bentonítico



Filtration pressure 200 psi; drill string rotation 90 rpm. Mud velocity between 4 1/4 drill collar and 5 3/4 hole:

Run	Velocity
40	92 gal./min. 2.5 ft/sec
41	40.5 1.1
42	125 3.4
43	111 3.0

Average properties:

API 30 min. filter loss	4 ml
Marsh viscosity	50 sec
Stormer viscosity	25 cp
Density	75 pcf

Fig. 2.18: Filtrado dinámico para un lodo almidón de cal

II.III.I Ciclo de filtrado en la perforación de un pozo.

En la perforación de un pozo, el filtrado inicialmente toma lugar bajo condiciones dinámicas cuando el lodo se encuentra circulando, y bajo condiciones estáticas cuando no existe circulación alguna esto se presenta cuando se realiza alguna operación en el pozo para realizar alguna conexión, cambiar una barrena, etc. Un enjarre bajo condiciones estáticas es colocado por encima de un enjarre dinámico, por lo que la velocidad de filtrado decrece y el espesor de enjarre se incrementa, como se muestra entre los tiempo T_3 y T_4 de la figura 2.14.

La cantidad de filtrado que invade la formación bajo estas condiciones puede ser calculada con aproximación por la ecuación 2.6 asumiendo que el enjarre dinámico se colocó bajo condiciones estáticas, y obteniendo los valores de Q_w y el tiempo correspondiente al espesor dinámico del enjarre a partir de los datos de pruebas estáticas. Estos cálculos muestran que la cantidad de filtrado que invade a la formación bajo condiciones estáticas son comparativamente menores, incluso durante cierres muy prolongados esto se puede apreciar en la figura 2.20.

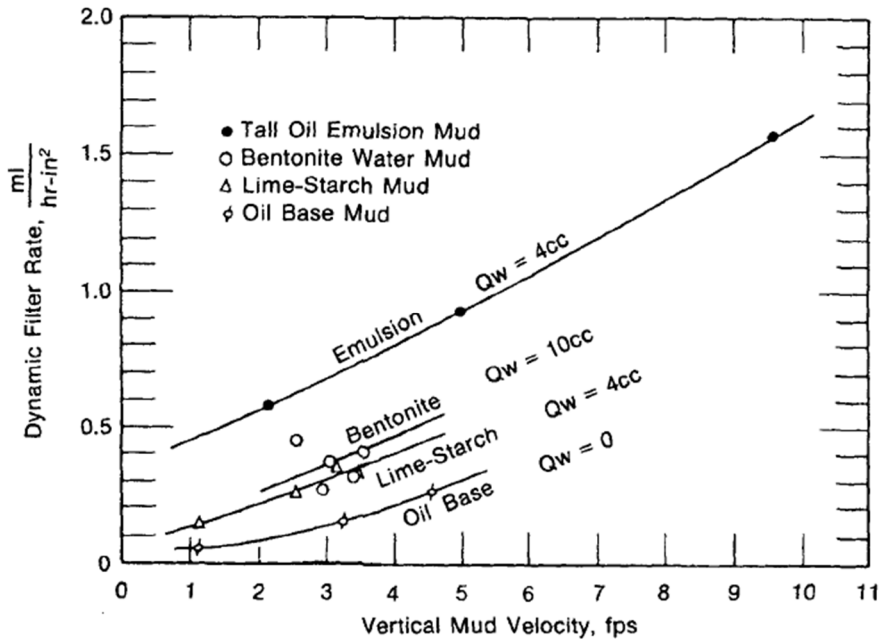


Fig. 2.19: Dependencia de la velocidad de filtrado en el equilibrio dinámico sobre la velocidad de flujo de un lodo a 75°F

Cuando la circulación se reanuda, las capas suaves en la parte superior del enjarre estático son erosionadas, y el espesor del enjarre decrece (ver T_4 a T_5 de la figura 2.14), pero la mayor parte del enjarre estático permanece. De T_5 a T_6 , el espesor del enjarre nuevamente permanece constante cuando la velocidad de filtrado decrece a un nuevo valor en equilibrio. Así el espesor del enjarre aumenta en cada ciclo dinámico-estático.

El crecimiento del enjarre está limitado por el desgaste mecánico cuando la tubería de perforación se encuentra rotando. Y por la abrasión al tirar o correr la tubería, pero estos efectos no pueden ser cuantificados.

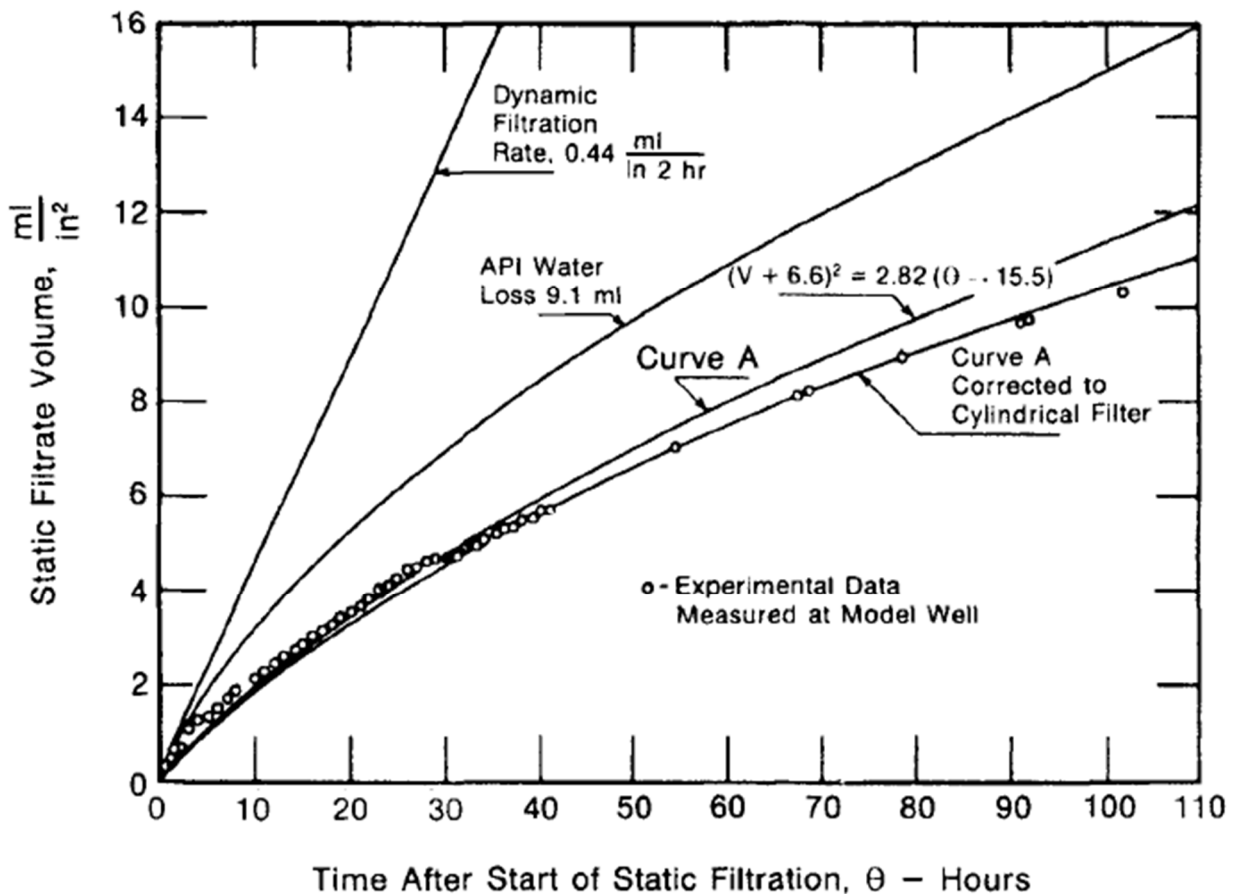


Fig. 2.20. Filtrado estático para un lodo bentonítico

II.III.II Filtrado bajo la barrena

Muy poco enjarre se forma en el fondo del pozo debido a la acción de inyección del lodo que es altamente erosiva. En un tiempo se pensó que la invasión mayor en el filtrado tomaba lugar bajo la barrena, pero varias investigaciones han mostrado que debajo de la barrena, el filtrado se encuentra rigurosamente restringida por un enjarre interno que se forma en los poros de la roca justo en la parte delantera de la barrena. En efecto, inclusive si el fluido de perforación fuera agua, el filtrado es restringido (aunque en un grado menor) esto debido a que los sólidos perforados obturan los poros.

Ferguson y Klotz²⁴ estimaron la cantidad de volumen de filtrado que tendría lugar en varias etapas de perforación y terminación de un pozo hipotético, asumiendo arena de 7000 pies a una profundidad total de 7500 pies. Los resultados se muestran en la tabla 2.5; y muestran que alrededor del 95% de la invasión podría tomar lugar bajo condiciones dinámicas bajo la perforación, y solo el 6% bajo condiciones estáticas cuando se dispara el intervalo y completando el pozo.

Havenaar²⁷ deriva la siguiente ecuación para el filtrado a través del fondo del pozo cuando se encuentra perforando.

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\left(\frac{nm}{C}\right)} \dots \dots \dots \text{Ecuación (2.14)}$$

Donde Q es la velocidad de filtrado en cm³/seg. n el número de conos en la barrena rotando a m veces por segundo, y C es determinado por la ecuación 2.7, utilizando datos de las pruebas de filtrado API.

Tabla 2.5. Programa de perforación y su invasión de filtrado en cada operación.

Operación	Tiempo [hrs]	Volumen de filtrado [ml/in ²]	Radio de invasión [pg]	Espesor de la zona invadida [pg]
Perforación a través de la zona de 5 fph			7.3	3.5
Perforación por debajo de la zona en 5 fph	50	120	18.4	14.6
Durante el viaje para reemplazar la barrena	8	3.5	18.6	14.8
Perforación por debajo de la zona en 5 fph	50	120	18.4	14.6
Registro de pozo, tiro de tubería, correr la tubería	12	2.9	21.3	17.5
Condición del pozo para colocar el casing				
Circulación del lodo de perforación	2	2.9	21.5	17.7
Colocar la tubería para registros	4			
Colocar el casing	12	2.9	21.7	17.9
Cementar la T.R, fin del filtrado de lodo				
Filtrado total	138	192	21.7	17.9

En la tabla 2.6 compara las velocidades de filtrado calculadas con la ecuación 2.13 con los datos experimentales de Ferguson y Klotz. La pobre correlación obtenida con el lodo base aceite es probablemente porque los enjarres de los lodos base aceite son muy fácilmente

erosionados, la ecuación 2.13 deja de lado la erosión por el flujo del lodo.

De la figura 2.19 observamos que la velocidad de filtrado debajo de la barrena no tiene relación laguna con la pérdida de filtrado API. Esta falta de correlación fue claramente mostrada por Horner²⁵ quien midió las velocidades en el filtrado dinámico durante una prueba perforando con una microbarrena bajo condiciones donde casi todo el filtrado venia por debajo de la barrena (ver la figura 2.21). Sus resultados también mostraron que las velocidades de filtrado por debajo de la barrena, a diferencia de las velocidades de filtrado a través de las paredes del pozo, es influenciada por la permeabilidad de la formación (ver la figura 2.22). Igualmente pruebas realizadas por Lawhon²⁸ mostraron que no existía una correlación con la pérdida de filtrado API.

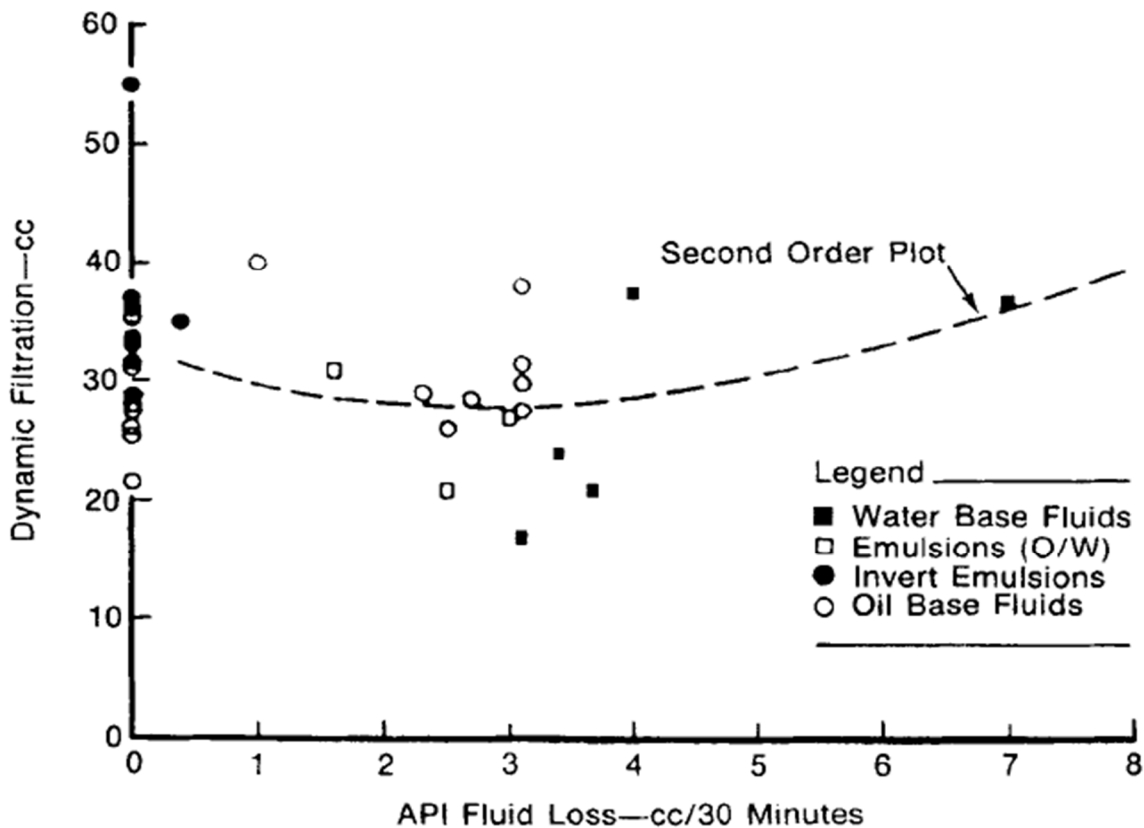


Fig. 2.21: Velocidad de filtrado bajo la barrena contra pérdida de filtrado API.

Tabla 2.6. Comparación de las velocidades de filtrado en el fondo del pozo experimental y las calculadas analíticamente

Lodo	V ₃₀ [ml]	C [seg/cm ²]	Velocidad de perforación [fph]	Velocidad de filtrado en el fondo del pozo (Q= cm ³ /seg)	
				Calc	Exp
Campo	10.1	7.2 x 10 ⁴	11.3	1.6	3.7
Gel	10.5	6.7 x 10 ⁴	11.6	1.6	3.6
Gel	10.5	6.7 x 10 ⁴	6.2	1.6	2.5
Base aceite	0.2	1.8 x 10 ⁸	32	0.04	2.5
Almidón de cal	4.1	4.4 x 10 ⁵	19	0.73	0.60
Almidón de cal	4.1	4.1 x 10 ⁵	43	0.73	0.6 - 4

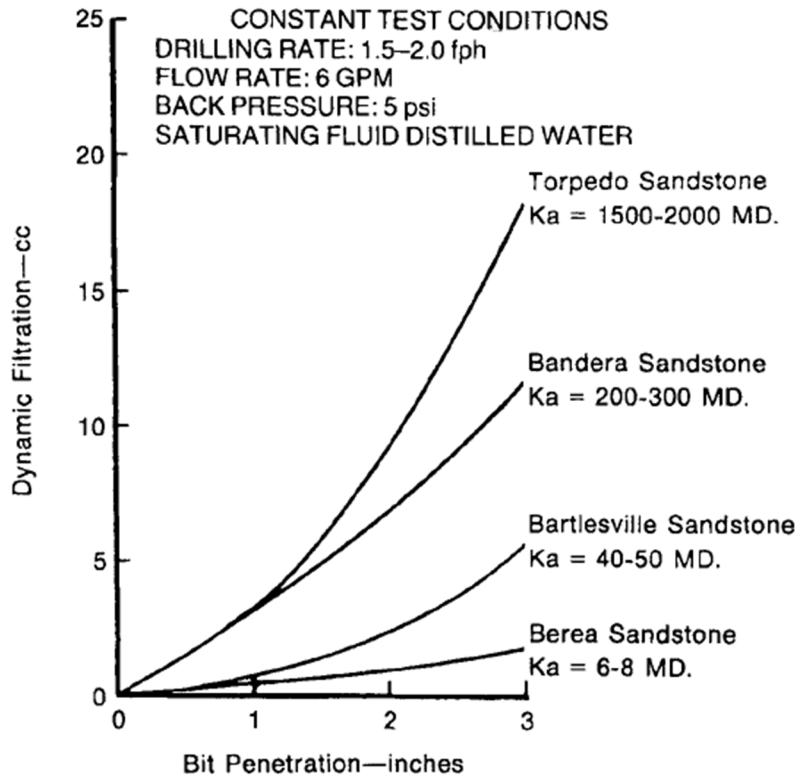


Fig. 2.22: Efecto de la permeabilidad de la roca sobre la velocidad de filtrado dinámico bajo la

II.III.III Evaluación de la velocidad de filtrado en el fondo del pozo.

La falta de una correlación entre el filtrado API y el filtrado dinámico mostrado en la figura 2.19 arroja dudas sobre la validez de las pruebas API como criterio para realizar pruebas de filtrado en el fondo del pozo. Un trabajo experimental realizado por Krueger²⁹ justificó estas dudas. Krueger agregó cantidades cada vez mayores de agentes para la reducción de filtrado a muestras estándar de lodos arcillosos, y midió cambios que existían en la velocidad de filtrado al alcanzar el equilibrio dinámico en comparación con la pérdida de filtrado API. En las pruebas dinámicas, el lodo se circuló más allá de las caras de los núcleos de areniscas colocados sobre una celda cilíndrica contenida en un mandril concéntrico. La presión de filtrado fue de 500[psi], la temperatura fue de 170[°F] y la velocidad del fluido fue de 110[ft/min]. Los resultados mostraron que hubo una relación diferente entre la velocidad de filtrado dinámico y la velocidad de filtrado API para cada agente (ver la figura 2.23).

La misma relación de velocidad fue obtenida cuando las velocidades dinámicas fueron medidas después del depósito del enjarre estático (ver la figura 2.24). Krueger también encontró que la emulsión del diesel dentro del lodo disminuyó la pérdida en el filtrado API de forma muy apreciable, pero incremento la velocidad de filtrado dinámico de una manera muy brusca.

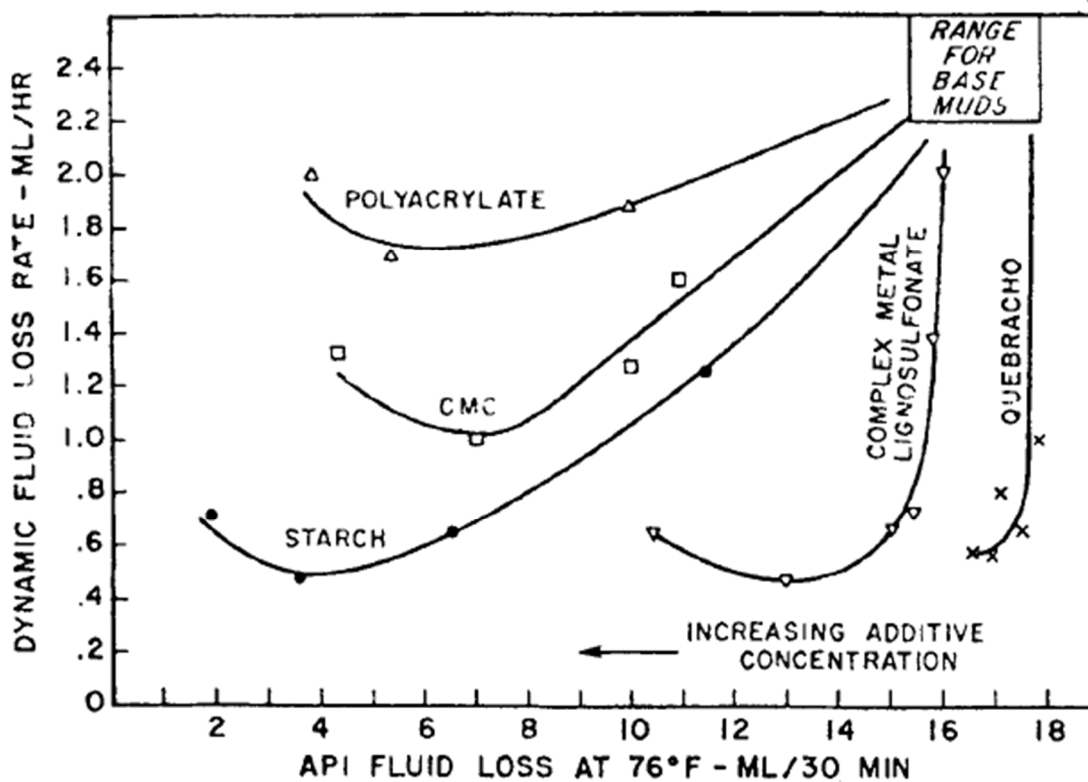


Fig. 2.23: Comparación del filtrado dinámico en núcleos de arena de una pulgada de diámetro en una prueba de filtrado API. Lodo arcilloso tratado con varios aditivos, enjarre estático se depositó sobre el enjarre dinámico.

Parece ser que la falta de correlación entre la pérdida de filtrado dinámico y la pérdida de filtrado API se debe a dos factores.

1. **Diferencias en la erosión de los enjarres.** Se observaron altas velocidades en el filtrado dinámico en todas las pruebas de lodos base aceite, y sus enjarres fueron muy suaves. Por otro lado se observaron bajas velocidades de filtrado dinámico en lodos que contenían lignosulfatos y quebracho.
2. **Diferencias en el radio de volumen de filtrado con el volumen del enjarre,** que afectan la pérdida de filtrado API (ver la ecuación 2.6) pero no pasa con el filtrado dinámico. Las únicas variables que relacionan el lodo con las velocidades de

filtrado dinámico son el espesor y permeabilidad del enjarre, para una permeabilidad dada el espesor que alcanza en el equilibrio el enjarre depende de la erosión de este mismo. Por ejemplo, si la concentración de arcilla en suspensión se incrementa, la pérdida de filtrado API decrece, pero la pérdida de filtrado dinámico permanece constante.

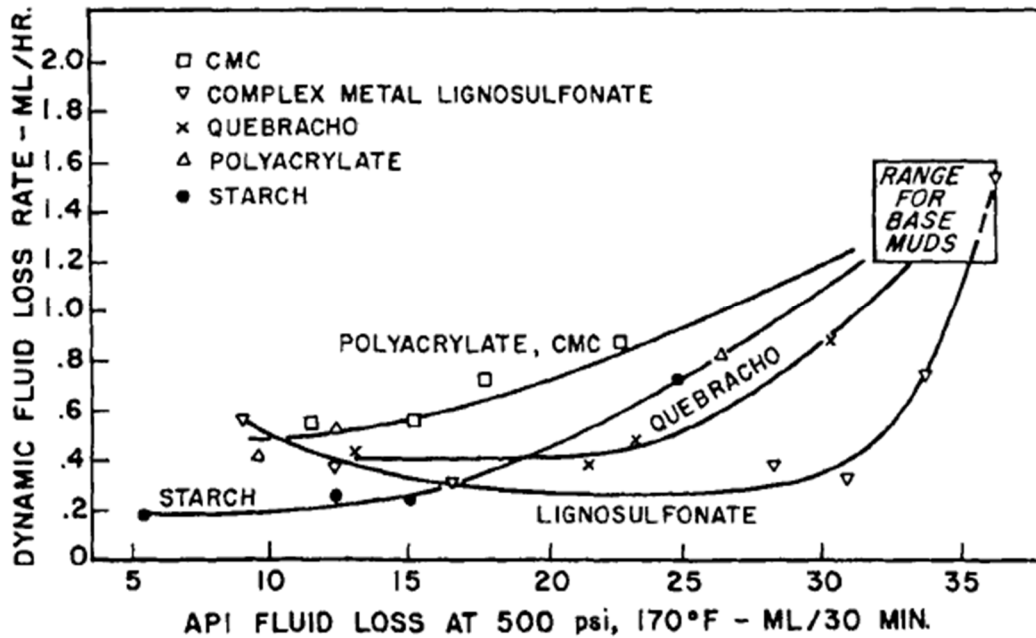


Fig. 2.24: Comparación del filtrado dinámico en núcleos de arenisca de una pulgada de diámetro en una prueba de filtrado API a 500psi y 170°F. Lodo bentonítico tratado con varios aditivos, enjarre estático se depositó sobre el enjarre dinámico.

Outmans⁴ ha sugerido que las diferencias en la viscosidad pueden ser responsables de esta pobre correlación. Porque la viscosidad influencia el esfuerzo cortante ejercido por la corriente del lodo sobre la superficie del enjarre. Sin embargo, ni Prokop²³ ni Horner²⁵ encontraron una relación entre la viscosidad y la velocidad dinámica de filtrado.

El peligro de depender en la de filtrado API como un criterio para la pérdida dinámica de filtrado en el fondo del pozo es obvio. Un agente de tratamiento que se recomienda como base de la prueba API podría dar resultados mayores de filtrado en el fondo del pozo que otro agente que dio una alta pérdida de filtrado en el método API. Peor aún, un agente que reduce pérdida de filtrado API, puede incrementar la pérdida de filtrado dinámico dentro del pozo.

A pesar de sus diferencias, el método API o alguna prueba estática similar es la única prueba práctica para el control de filtrado en el pozo. Sin embargo, los resultados deben ser interpretados con correlaciones hechas en el laboratorio entre la pérdida de filtrado API y el filtrado dinámico, pero se deben utilizar lodos locales y agentes de tratamiento. La interpretación de los datos sería de gran ayuda si las permeabilidades de los enjarres fueran obtenidos. La permeabilidad del enjarre puede ser calculada de manera muy simple con la pérdida de filtrado API, el espesor del enjarre, y la ecuación 2.12. En la medición del espesor del enjarre la capa superficial blanda no debe ser considerada, ya que esa parte del enjarre no se presenta en el enjarre dinámico. Por supuesto, es imposible conocer el espesor del enjarre en el fondo del pozo, pero datos comparativos se tendrían si algún procedimiento estándar fuera adoptado. Un método sería utilizar un estimado del espesor del enjarre³⁰, es mediante el uso de un pistón que se puede ponderar o calibrar para penetrar las capas del enjarre con cierta consistencia. El grado requerido de penetración puede ser establecido en el laboratorio mediante la correlación estática y dinámica de los espesores del enjarre.

Capítulo III

MÉTODO DE PRUEBA PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE FILTRADO DINÁMICO A ALTA PRESIÓN Y A ALTA TEMPERATURA PARA FLUIDOS DE PERFORACIÓN BASE AGUA.

El propósito de este capítulo es enlistar la serie de pasos que se deben de llevar a cabo para realizar una prueba que determine la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y alta temperatura para los fluidos de perforación base agua, empleando un instrumento de laboratorio que simula las condiciones de operación dentro del pozo.

Es importante mencionar que estudios realizados por (C.Bezemer y I. Havenaar)³¹ mostraron que un instrumento de laboratorio que simulaba las condiciones de operación dentro de un pozo donde se hacía fluir el lodo de la misma manera que en un viscosímetro rotacional, mostraba relaciones idénticas a las de determinó un equipo a escala real trabajando bajo las mismas condiciones de operación.

Por tal motivo, se llegó a la conclusión de que es más factible realizar las pruebas de filtrado dinámico mediante el empleo de un instrumento de laboratorio como es el caso de FANN modelo 90.

El FANN modelo 90 “Sistema de Filtración Dinámica” es un instrumento computarizado en donde se realizan pruebas de filtrado dinámico, este instrumento simula las condiciones de presión, temperatura y velocidad de corte dentro del pozo.

Se emplean una amplia selección de núcleos con diferentes gargantas medias de poro para simular la formación en estudio. De la gama de

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

núcleos disponibles por el fabricante, se utilizará en la prueba el núcleo que más se asemeje a la formación de interés.

El núcleo de filtrado es un cilindro con pared espesa con las características semejantes a las de una formación rocosa. Esto para simular el depósito y la generación del enjarre en la formación. Con la porosidad y la permeabilidad del núcleo, se puede simular la cantidad de fluido perdido en la formación y este volumen de fluido filtrado puede ser medido para un análisis de resultados.

Los resultados van siendo mostrados en pantalla cuando la prueba está en proceso y pueden ser leídos en el monitor después de que la prueba haya sido completada. El resumen de los resultados estará disponible en pantalla y puede ser almacenado en forma de archivo para PC, también pueden ser enviados directamente a impresión.

A continuación, se describe de manera general el equipo FANN 90 y se enlistan la serie de pasos que se deben llevar a cabo para realizar una prueba; indicando como manipular el equipo y con ello obtener resultados satisfactorios.



Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

III.I DESCRIPCIÓN GENERAL DE OPERACIÓN DEL FANN 90

III.I.I Sistema de Control de Presión: La presión es introducida mediante una fuente externa de energía, usualmente a través de tanques de nitrógeno y un grupo de válvulas solenoides regulan la presión incrementándola o disminuyéndola por medio de venteo hacia la atmósfera.

Durante la prueba, la presión que se tiene como objetivo será la más alta que alcance el sistema durante la prueba. Esta presión es introducida en la sección *PROGRAMACIÓN DE LA SECUENCIA DE UNA PRUEBA*. En caso de no ser programada, el instrumento determina una presión que es calculada en base a la temperatura a la que se encuentre sometida la muestra. La presión que es calculada se obtiene en [Kpa] y es igual a 26^* (la temperatura de la muestra en °C) cuando la temperatura se encuentra por encima de 50°C. Esto es suficiente para prevenir la ebullición de una muestra típica de fluido de control.

III.I.II Sistema de Calentamiento y Enfriamiento: El calentamiento se logra a partir de un bloque cilíndrico dividido en dos, donde cada mitad contiene dos cartuchos calentadores para un consumo total de 1200 [watts]. Existe un contacto íntimo entre el calentador y la pared de la celda, esto para que se pueda transmitir el calor de forma eficiente. Una mitad del calentador se encuentra colocada en la puerta del instrumento y se encuentra integrado un termopar que es monitoreado constantemente por un microprocesador para supervisar la temperatura. La velocidad de enfriamiento está en función de la temperatura ambiente y de la temperatura a la que se encuentre la muestra.

La temperatura de la muestra es moderada por medio de un dispositivo que consiste en una resistencia térmica, sus siglas en

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

ingles son (RTD) que significa *Resistance-temperature-device* que se encuentra dentro del agitador y esto es monitoreado por otro módulo microprocesador también trasmite el valor a la computadora.

La computadora usa una combinación de la temperatura del bloque y la temperatura de la muestra para calcular los requerimientos de calentamiento y enfriamiento.

III.I.III Sistema de Control de la velocidad de corte: Un motor de corriente alterna localizado en la parte superior de la celda, genera la potencia necesaria para proporcionar la energía al sistema. La velocidad del motor es transmitida por medio de un cinturón en “V”. El eje que transmite el esfuerzo cortante está soportado en la parte superior por un cojinete de plástico y en el inferior por un balín de orientación.

La velocidad del eje que transmite el esfuerzo cortante, es controlada por medio de imanes que se encuentran en la parte superior de este mismo eje. Un sensor que trabaja por medio de un campo magnético se encuentra localizado afuera de la celda sobre un disipador de calor. La respuesta del sensor es enviada a un módulo que consta de un microprocesador y este a su vez envía una señal a la computadora cuando es requerida una velocidad dada.

III.I.IV Sistema de Filtrado: La presión diferencial actúa entre la muestra dentro de la celda y la pared trasera del núcleo de filtrado “*pared del diámetro exterior del núcleo*”. Esta presión diferencial es inducida reduciendo la presión por encima del pistón de filtrado en el colector hacia una presión menor; teniendo así una presión menor en la celda de presión. El volumen debajo del pistón de filtrado experimenta aproximadamente la misma presión.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

El volumen por debajo del pistón es conectado hacia la válvula de filtrado, cuando la válvula es abierta el fluido fluye de la muestra hacia la pared del núcleo de filtrado y pasa a través de una manguera a el fondo de la celda. Posteriormente el filtrado sigue su curso fluyendo a través de esta; el filtro detiene las partículas grandes lo suficiente para conectar la válvula de filtrado. El tamaño nominal del filtro es de 440[micrones]; esto es montado en la manguera donde es accesible para su limpieza. El filtro es más útil cuando se cuartea el núcleo de filtrado, permitiendo que la muestra llegue sin fluido de filtrado.

En la línea de filtrado, el fluido fluye dentro del instrumento hasta la válvula de filtrado. De esta válvula fluye al fondo del colector donde empuja al pistón de filtrado hacia arriba, el movimiento del colector es transformado en un voltaje por medio de un sensor en el colector el cual, está magnéticamente adjunto al pistón de filtrado. El voltaje es digitalizado por un microprocesador y este es enviado a la computadora cuando este es requerido.

Cualquier masa de aire o fuga en el sistema de filtrado es muy perjudicial en el rendimiento y funcionamiento de los instrumentos. Aire o cualquier gas puede causar un movimiento anormal en el pistón, el volumen medido de filtrado puede llegar a ser mayor, las fugas pueden causar pérdidas en el volumen de filtrado.

III.I.V Sistema de Purga: El sistema de purga sirve para remover el aire del sistema. Esto consiste principalmente de un accionamiento magnético, desplazamiento positivo, una bomba de engranajes y de una válvula check. El fluido de purga es prolongado a un puerto en el lado derecho del instrumento dentro del lado de succión de la bomba. El fluido posteriormente es forzado a fluir hacia afuera de la bomba a través de la válvula check e introducido al sistema de filtrado. La ubicación de la conexión para el sistema de filtrado fue seleccionado de modo que el flujo del fluido de purga sea opuesto a la dirección de flujo del fluido de filtrado. Este respaldo vacía el sistema de filtrado y

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

ayuda a limpiarlo. El fluido de purga fluye a través de la válvula de filtrado pasando por la manguera y hacia dentro de la base del núcleo de filtrado trasladando al aire contenido hacia afuera del sistema por medio de este fluido. El fluido de purga es normalmente forzado a pasar a través del núcleo de filtrado para remover el aire dentro de los poros.

Parte del fluido de purga fluye directamente al fondo del filtro del colector, por debajo del pistón de filtrado. Este fluido es liberado mediante la apertura de la válvula de purga, liberando cualquier rastro de aire. Durante la purga, la parte alta del colector de filtrado que se encuentra por encima del pistón, es presurizada para mantener este pistón en el fondo y evitar cualquier golpe.

III.II FUNCIONES DEL TECLADO

Algunas generalizaciones pueden ser realizadas con las funciones del teclado del instrumento. Solo es requerido presionar firmemente en el centro de la tecla para operar de modo seguro y obtener así una respuesta del instrumento. Debido al ligero retraso en la respuesta de la computadora, la tendencia es presionar más fuerte y más veces que las requeridas por lo tanto debe considerarse lo antes mencionado. Después de presionar la tecla, la computadora demora un lapso corto de tiempo para desplegar la información en la pantalla no es de manera inmediata.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

Las teclas que no son números tienen las siguientes funciones:

ENTER: Activa los elementos del menú que han sido indicados con el apuntador " → " junto al elemento seleccionado, también sirve para introducir los valores numéricos.

FLECHAS (arriba y abajo): Son utilizadas para desplazar el apuntador " → " desde un punto a otro en un menú o de la pantalla de una secuencia de edición para una prueba. También son usadas durante una prueba para saltar al siguiente paso o regresar al paso previo. En los datos de acceso mostrados, son utilizados para pasar a la siguiente serie de datos.

START: Se utiliza para iniciar algunas operaciones. Y también se usa en la pantalla de acción de una secuencia de prueba para hacer que abra la válvula de filtrado.

STOP: Se utiliza para detener muchas operaciones. Además se usa en la pantalla de acción de una secuencia de prueba para hacer que cierre la válvula de filtrado. También es usada para que al ser presionada en la parte superior de la pantalla de acción de una secuencia de prueba pueda salir del editor. El mensaje de "STOP" – "Exits" es mostrado como indicación de la instrucción. En algunos casos, el parar también limpiará el valor a cero.

. (PUNTO DECIMAL): Además de su función normal con los números que no siempre es permitido, el punto decimal también es usado para mandar un avance a una impresora cuando uno se encuentra en el menú de prueba y en los datos de acceso de menú.

III.III FUNCIONES DE PANTALLA

El software del Fann modelo 90 presenta una serie de menús que el operador puede seleccionar. Una vez que es encendido el instrumento aparecerá un desplegado que dice “PLEASE WAIT” y después de pocos segundos aparecerá un anuncio con los derechos de autor. En la parte superior izquierda se observará el tiempo de prueba total del instrumento en horas y a la misma altura pero del lado derecho la temperatura en miles de grados hora. Una prueba de una hora a 200°C añade 0.2Khr para el total acumulado. Esta información es útil para usos de mantenimiento.

Después de algunos segundos es presentado el menú principal “MAIN MENU” en adición a la fecha y a la hora. En la pantalla del menú principal “MAIN MENU” tres elementos pueden ser seleccionados.

1. **CALIBRATE** “CALIBRACIÓN” Esto es para la designación de procedimientos y para realizar los cambios en los parámetros con los que trabaja el equipo.
 - A. El sistema de unidades, en el sistema inglés o en el internacional.
 - B. Cambios de la fecha y hora.
 - C. Dimensiones del núcleo de filtrado y del eje de corte.

Nota: Una vez que los parámetros son establecidos, estos pasos no necesitan ser repetidos a menos que un parámetro necesite ser cambiado.

También se incluye en el menú de calibración “CALIBRATE MENU”, el procedimiento de calibración para el colector de filtrado. A diferencia de los procedimientos anteriores la calibración del colector de filtrado debe realizarse una vez cada 5

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

o 10 pruebas para asegurar que el volumen del colector pueda leerse con precisión. Una comprobación rápida de su calibración es observar que el volumen en el colector es cercano a cero al comienzo de la prueba. Otra forma de corroborarlo es que el volumen total de filtrado es aproximadamente el mismo que el volumen medido mediante el vertido del fluido en una probeta al final de la prueba.

2. **TEST “PRUEBA”** Este menú es para designar las condiciones de la prueba y ejecutarlas. Al seleccionar esta opción, se mostrará el menú de pruebas “TEST MENU” una opción de este menú es la de correr la prueba “RUN TEST”. El equipo correrá la última secuencia de prueba en la memoria, eso si no se ha realizado ninguna edición en la prueba. La fecha en la que se realizó la última edición será desplegada en la pantalla para ayudar a identificar la secuencia de prueba.

En la pantalla que se muestra en la opción de corriendo la prueba “RUNING TEST SCREEN” muestra los valores que se tienen como objetivo en ese paso de la prueba y las condiciones a tiempo real de la prueba a lo largo de su progreso.

Otras opciones del menú de prueba “TEST MENU” son:

- A. *Configuración de la secuencia de prueba:* Permite la programación de los pasos y de la condición a la que someterá cada paso. Nota: Si la opción de STARDARD TEST es seleccionada de este menú de secuencia de prueba se trabajará con los parámetros establecidos y programados dentro de la computadora del equipo.
- B. *Imprimir secuencia de prueba:* Puede ser utilizada para imprimir la secuencia actual ya sea antes de que se esté ejecutando la prueba para verificar la exactitud del programa o después de que se corrió la prueba para

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

verificación de la secuencia y de los valores que se tenían como objetivo.

C. Enfriamiento y Calentamiento: Permite que el instrumento sea llevado cerca de las condiciones ambientales después de que se ha llevado a cabo una prueba o se haya detenido una prueba.

Nota: la presión alta (HP) suministrada debe ser conectada y presurizada antes de que las funciones de calentamiento y enfriamiento o el sistema de purga puedan operar.

D. Sistema de purga: Es usado para iniciar la secuencia de purga. El sistema de purga debe de estar libre de gases antes de que se corra la prueba. Esta purga expulsa el aire de la trayectoria de flujo entre el exterior del núcleo de filtrado en la celda a la parte inferior del pistón flotante en el colector. Este pistón es conectado a un transductor que mide el volumen de filtrado. Es muy importante que el fluido no contenga burbujas de aire al comenzar cada prueba.

3. **DATA ACCESS** “DATOS DE ACCESO”: Esta es la designación de los procedimientos para recolectar y almacenar los datos en una prueba. Estos datos pueden ser guardados y ser impresos con un resumen de cada uno de los pasos y ser transmitidos a una computadora

En general se puede presionar “EXIT” para salir al menú anterior.

III.IV OPCIONES DE UNA SECUANCIA DE PRUEBA

Una secuencia de prueba consiste en una serie de pasos en donde se desea alcanzar ciertos valores que se tienen como objetivo. Para cada uno de los estos pasos, los parámetros como presión temperatura etc., deben de alcanzar el valor deseado y mantenerlos según sea el caso. El sistema es capaz de controlar estas variables ya sea incrementando la temperatura de forma lenta o de incrementarla lo más rápido como el sistema pueda, pero recordando que el instrumento tiene como memoria máxima el almacenamiento el de solo 20 pasos.

Cuando las condiciones de la etapa o paso en curso se han alcanzado y el tiempo programado para el paso ya ha transcurrido, el instrumento procederá a avanzar al siguiente paso o etapa. Es posible programar condiciones que no puedan ser alcanzadas, en este caso el instrumento se mantendrá en el paso erróneo hasta que la prueba sea terminada por el operador o se forcé el avance al siguiente paso. La transición a otro paso puede ser forzada por medio de las flechas en el teclado de control.

En general es conveniente estandarizar la secuencia de la prueba tanto como sea posible y así se lleve una fácil comparación de las pruebas. Por esta razón la sugerencia de una prueba estándar que se ha programado dentro de la memoria del instrumento. Y esta prueba estándar solo puede ser cambiada por un ordenador externo.

En el siguiente procedimiento se describen a detalle las condiciones objetivo que pueden ser programadas. Esta información es introducida en el instrumento y este almacena la información en la opción de última prueba "LAST TEST" hasta que sea editada nuevamente.

Generalmente una prueba consiste de los siguientes cinco pasos.

- **PASO 1** Establece las condiciones estáticas

Este es normalmente el paso en el que la presión estática es aplicada y cuando la muestra es llevada a la temperatura deseada. El tiempo programado para este paso es usualmente cero, esto para obtener las condiciones deseadas en el mínimo tiempo posible. Durante este paso, la muestra es usualmente agitada a una velocidad de corte de 100[1/s]. No debe haber recolección de filtrado en este paso ya que las condiciones no han sido estabilizadas. La presión diferencial debe ser cero y el flujo de filtrado debe estar cerrado "OFF"

- **PASO 2** Establece la presión diferencial

Este paso comienza posteriormente de que las condiciones del paso anterior han sido alcanzadas. Usualmente la temperatura que se tiene como objetivo es la misma que la del paso anterior. Solo unos pocos segundos son requeridos para ajustar la presión en el colector. El tiempo programado en este paso es cero. La presión estática, la velocidad de corte y el flujo de filtrado es usualmente el mismo que en el paso 1.

- **PASO 3** Permite la estabilización de la presión diferencial

En este paso se proporciona el tiempo para que las condiciones de los pasos 1 y 2 logren su estabilización antes de que comience la filtración. Programar 2 minutos es adecuado para lograr la estabilidad. La presión estática, la velocidad de corte y el flujo de filtrado es usualmente el mismo que en los pasos 1 y 2.

- **PASO 4** Recolección de datos de la filtración dinámica

Este es el paso de la prueba en el que todas las condiciones de la prueba se mantienen constantes mientras el filtrado es colectado. La duración de este paso es generalmente de 45 a 90 minutos. Las condiciones de este paso son usualmente las mismas que en el paso 3 excepto que el flujo de filtrado está en “ON”

- **PASO 5** Enfriamiento y liberación de presión

Durante este paso la celda será enfriada a una temperatura donde pueda manejarse de forma segura y la presión será ventilada. El tiempo del paso será programado a cero para lograr un enfriamiento en un mínimo de tiempo. La presión estática como objetivo será ajustada a cero. El instrumento mantendrá la suficiente presión en la celda durante el enfriamiento para prevenir la ebullición de la muestra. La presión que se mantendrá será de 6.79[psi/°F] equivalente a 26[Kpa/°C]. El instrumento reduce la presión conforme decrece la temperatura hasta que se logra alcanzar la temperatura esperada y la celda se encuentra totalmente ventilada. Esta temperatura es usualmente 115°F equivalente a 46°C. La velocidad de corte que se tiene como objetivo en este paso es usualmente programada a 100[1/s] para ayudar al enfriamiento de la muestra. Debido a que durante el enfriamiento no se recoge filtrado, el flujo de este se encuentra en “OFF”.

Seis parámetros deben ser establecidos para cada uno de los pasos que componen la secuencia de una prueba.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

1. **STEP TIME** “Tiempo de duración del paso”: Es el tiempo que debe transcurrir para que las condiciones designadas sean alcanzadas. Para pasos en los que se desea que este sea mínimo, la condición de tiempo debe ser fijado en “0” y así el instrumento alcanzará estas condiciones en el menor tiempo posible. Cuando todas las condiciones son aceptables dentro de las tolerancias, el instrumento procederá al siguiente paso.
2. **STATIC PRESS (PRESSURE)** “Presión estática”: La presión que se aplica a la muestra dentro de la celda es la presión que se aplica dentro del diámetro del filtro.
3. **DIFERENTIAL** “Diferencial”: La presión diferencial a través de la pared del núcleo de filtro y de cualquier enjarre es igual a la presión estática menos la presión en el colector de filtrado conocida también como (back pressure).
4. **TEMPERATURE** “Temperatura”: La temperatura deseada de la muestra dentro de la celda al término de cada etapa.
5. **SHEAR RATE** “Velocidad de corte”. La velocidad a la que el fluido es cortado en el espacio anular entre el diámetro interior en la superficie del núcleo de filtrado y el eje de corte. Esta velocidad de corte asume un fluido newtoniano y no considera un enjarre. Esto es esta en función de la geometría del espacio anular. Para que el instrumento alcance una correcta velocidad de corte, las dimensiones del núcleo de filtrado y las del eje de corte deben ser introducidos en la calibración del instrumento. Para más detalles de cómo poder introducir estos valores debe referirse a la sección de PROCEDURE FOR CALIBRATION “Procedimiento de calibración”. La velocidad de corte es proporcional a la velocidad de rotación del eje de corte. El instrumento calcula la velocidad correcta de rotación utilizando las dimensiones del núcleo de filtrado y del eje de corte.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

6. **FILTRATE** “Filtrado”: La posición de la válvula de filtrado en el inicio del paso es programada por el operador. Esto controla que la filtración se lleve a cabo o no se lleve. “OFF” significa que la filtración no se está llevando a cabo y “ON” el que si se está llevando a cabo.

Pueden ser programadas hasta 20 etapas para las variaciones en el procedimiento con que se lleva a cabo una prueba. Por ejemplo, la muestra puede ser calentada a una temperatura intermedia sostenerla en esa temperatura por un periodo de tiempo y posteriormente puede llevarse a otra temperatura más alta y después realizar el filtrado. O bien, la velocidad de corte puede ser cambiada de un paso a otro, o añadir un nuevo paso para aplicar una diferente velocidad de corte. Estos son solo algunos ejemplos de las aplicaciones que se pueden llevar a cabo.

III.V PROGRAMACIÓN DE LA SECUENCIA DE UNA PRUEBA

Este procedimiento enlista la serie de pasos que se deben de llevar a cabo para la correcta programación de los pasos dentro de una secuencia de prueba.

1. Partir del menú principal “*MAIN MENU*” seleccionar Prueba “*TEST*”.
2. Del menú de prueba “*TEST MENU*” seleccionar “*SET UP TEST SEQUENCE*” establecer la secuencia de la prueba.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

3. Desde “*TEST SEQUENCE MENU*” seleccionar cualquiera de las opciones “*STANDARD TEST*”, “*NEW TEST*” o “*LAST EDIT*”. La selección dependerá de cuál sea la más conveniente. Cada una de ellas será explicada a continuación.

✎ “*STANDARD TEST*” Esta prueba es una secuencia corta que se encuentra pre-programada en el instrumento. Nos permite la selección de la temperatura que deseamos para realizar la prueba. La muestra es calentada a la temperatura seleccionada tan rápido como es posible manteniendo una presión adecuada. La filtración se realiza bajo condiciones constantes, y posteriormente se enfriará.

Al seleccionar esta opción una ventana aparecerá con el mensaje de que temperatura se manejará en la prueba por default es de 300°F que son (149°C) pero uno puede cambiar a la temperatura que desee, simplemente tecleando el valor de esta recordando el sistema de unidades que se esté manejando. Seleccionando la temperatura programada se mostrará la ventana de “*EDIT*” donde otros cambios adicionales podrán ser efectuados.

✎ “*NEW TEST*” Este tipo de prueba lo que hace es llevar los tiempos y valores de los objetivos a cero para todos los pasos de una prueba. La temperatura a la que se someterá la muestra será de 32°F. En el *FILTRADO*, la posición de la válvula esta por default en “*OFF*”. Esto es usado cuando se requiera una secuencia de prueba radicalmente diferente. Al seleccionar “*NEW TEST*” se mostrará en la pantalla el menú “*EDIT*” donde una nueva secuencia de prueba podrá ser programada.

✎ *“LAST/EDIT”* Esto lo que nos permite hacer es poder modificar la última secuencia de prueba programada. Al teclear *“LAST/EDIT”* se desplegará en la pantalla el menú de *“EDIT”* y las modificaciones deseadas podrán ser realizadas.

4. *“EDIT SCREEM”* Este menú de edición será desplegado en la pantalla del instrumento con el primer paso de la última secuencia de prueba realizada. Si no se desea realizar ninguna modificación, se deberá presionar la tecla de *“STOP”*, recordando que el apuntador *”↔“* deberá estar posterior al número de paso de la prueba *“STEP”* para poder salir del editor de prueba.

El número de paso de la prueba se localizará en la parte superior izquierda de la pantalla. Si se desea realizar alguna o varias modificaciones en algún paso de la prueba el apuntador *”↔“* se debe desplazar con las flechas del teclado de control del instrumento hasta posicionarlo en el lado derecho del valor que va a ser cambiado en ese paso, teclear el nuevo valor y presionar la tecla *“ENTER”* y el cambio será realizado; de igual forma después de presionar *“ENTER”* solo hay que desplazarse al siguiente valor que se desee cambiar y hacer el mismo procedimiento para poder realizar algún otro cambio.

5. Para cambiar al siguiente paso de la prueba y poder realizar los cambios que se deseen en esa etapa, se debe posicionar el apuntador en el lado derecho de *“STEP”* y teclear el número de paso, y presionar *“ENTER”* y de igual forma que se explicó en el paso 4 se pueden realizar las debidas modificaciones.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

6. Al cambiar al siguiente paso de la prueba que se va a modificar, en la pantalla se mostrarán las condiciones actuales de ese paso. Debajo de “*CURRENT*” hacia el centro de la pantalla, estarán enlistadas las condiciones que tiene como objetivo el paso anterior. Y que a su vez son las condiciones que se deberán alcanzar para poder iniciar el paso que se está modificando. Las condiciones actuales serían las iniciales “*INICIAL*” si el paso fuera el 1.

NOTA: En lugar de presionar la tecla “*ENTER*” para introducir el valor, Los botones de flecha podrán ser usados para mover el apuntador hacia la siguiente condición o hacia la condición previa. Estos botones también pueden ser utilizados como bypass para cualquier valor que no vaya a ser modificado.

7. Introducido el valor planeado de “*STATIC PRESSURE*”, el apuntador deberá de ser re-posicionado después del valor que tiene como objetivo la presión “*DIFFERENTIAL*”. Si se seleccionan más de 2500[psi] estas serán reducidas a 2500[psi] que equivalen a 17,237[KPa]

PRECAUCIÓN: Es posible que se puedan seleccionar valores de presión diferencial que puedan cuartear el núcleo de filtrado. Muchos núcleos de filtrado están limitados a soportar 500[psi] de presión diferencial que son equivalentes a 3500[KPa].

8. Seleccionado el valor de presión “*DIFFERENTIAL*”, el apuntador deberá ser re-posicionado después del valor objetivo para la “*TEMPERATURE*” de la muestra. Si más de 2500[psi] son introducidas como valor de “*DIFERENCIAL*” este será reducido a 2500[psi] que equivalen a 17,237[KPa].

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

9. Introducido el valor de la temperatura de la mezcla, el apuntador lo debemos re-posicionar en el siguiente valor objetivo que es velocidad de corte. Pero si más de 500[°F] son seleccionados, estos serán reducidos a 500[°F] equivalentes a 260[°C]. La temperatura más baja debe ser de al menos 10[°F] 6[°C] por encima de la temperatura ambiente.

10. Seleccionando la velocidad de corte planeada “*SHEAR RATE*”, el apuntador debe ser re-posicionado después del valor objetivo del “*FILTRATE*” que indica solo la posición de la válvula. La velocidad de corte debe de estar limitada a un equivalente de 1000 revoluciones por minuto [rpm]. La velocidad de corte que tendremos como límite depende de la geometría del eje de corte y del núcleo del filtro. Las dimensiones inscritas en la calibración “*CALIBRATION*” son utilizadas para determinar el límite. Para una configuración ESTÁNDAR el límite es 286[seg⁻¹].

11. Seleccionando la posición de la válvula del filtrado presionando “*START*” para “*ON*” (abierta) o “*STOP*” para “*OFF*” (cerrada). Esta será la posición deseada de la válvula al comenzar el paso de la prueba. El apuntador deberá ser re-posicionado después del número de paso “*STEP*” en la parte superior de la pantalla.

12. Repita para los 4 pasos de la prueba los puntos mencionados hasta que todos los pasos de la secuencia de la prueba hayan sido programados.

13. Para poder salir del editor presionamos “*STOP*” cuando el apuntador este sobre el número de paso en la parte superior de la

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

pantalla. En la pantalla aparecerá el menú de prueba “*TEST MENU*”.

La secuencia de prueba programada ha llegado a ser ahora la que se marca como la actual “*LAST/EDIT*” en la memoria del instrumento.

NOTA: Recordar que la prueba estándar “*ESTÁNDAR TEST*” sigue inalterable en la memoria del instrumento, esta no puede ser eliminada o modificada con el uso del teclado del instrumento.

III.VI EJECUTAR UNA PRUEBA

A continuación se mencionan la serie de pasos que se deben seguir para llevar a cabo el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para los fluidos de perforación base agua:

1. Encender el instrumento con el switch (interruptor) que se encuentra en la parte baja del lado derecho, esperar un poco y el menú principal “*MAIN MENU*” será desplegado en pantalla.
2. Desmonte la celda y desarme esta, en caso de que sea necesario la celda debe ser limpiada.
3. Confirmar que los anillos empacadores de la celda y el colector se encuentran en buenas condiciones, esto es verificando que no falte ninguno, y que no se encuentren resacos o agrietados.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

Instalación del núcleo de filtrado

4. Para una instalación más sencilla del núcleo de filtrado nos cercioramos de que la tapa de abajo de la celda donde se encuentran las concavidades se encuentren sobre los pins “patas” de la base localizada enfrente del instrumento, se debe verificar que embonen correctamente.

5. Confirmar que los balines del cojinete del soporte se encuentran en buenas condiciones de lo contrario se tendrán que cambiar, no debe de faltar ningún balín y estas deben de estar libres para rotar, y si es necesario se tendrán que limpiar.

6. Colocar el cojinete dentro de la ranura en la abrazadera del núcleo de filtrado esto se encuentra en la misma celda con las orejas del soporte hacia abajo.

7. Enroscar el soporte del núcleo de filtrado hacia arriba sobre la abrazadera de este mismo tanto como sea posible.

8. Limpiar con una capa de grasa lubricante el “O” ring (empaquete) en la tapa del núcleo de filtrado.

9. Colocar dentro del soporte del núcleo de filtrado los siguientes accesorios, en el orden que tiene la lista.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

- Junta del núcleo de filtrado.
 - El núcleo de filtrado.
 - Junta del núcleo de filtrado.
 - La tapa del núcleo con él "O" ring instalado.
10. Utilizar las pinzas especiales para el anillo sujetador y así colocar este en su ranura por encima de la tapa del núcleo de filtrado.
 11. Enroscar la base del núcleo de filtrado de forma descendente hasta que el núcleo de filtrado se encuentre en su lugar bien amordazado tensando la abrazadera del núcleo de filtrado de (40 a 47 N.m). Esto debe ser lo suficiente para tensarlo pero no debe ser tanto como para cuartearlo o inclusive romperlo.
 12. Lubricar el anillo que se encuentra cerca de la base suministrando una delgada capa de grasa. También se debe de aplicar otra capa de grasa a los hilos de la rosca por debajo del anillo empacador.
 13. Limpiar con una delgada capa de grasa a los hilos de la rosca de la celda "casing" justo donde se asentarán los anillos empacadores.
 14. Montar y enroscar la celda "casing" sobre el ensamble que se encuentra en la tapa baja que anteriormente fue lubricada.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

Purgar el sistema de aire

15. Estar seguro que las partes del colector se encuentran limpias, el colector es el cilindro metálico que se localiza en la parte superior derecha del instrumento.

16. Limpiar la parte interior del tubo colector de filtrado aproximadamente 4[cm] dentro de cada extremo suministrando una capa de grasa.

17. Lubricar el pistón de filtrado y su empaque de anillo de goma y empujarlo completamente a un extremo del tubo colector de filtrado.

18. Mover la celda de su base y la colocamos en el banquillo dentro del instrumento.

19. Se embona la manguera de la celda dentro del conector que se encuentra en la parte baja del lado derecho del instrumento en la conexión que dice celda.

20. Conectar la manguera de la entrada de la tapa del colector de filtrado en la parte baja del instrumento del lado derecho donde dice colector.

21. Colocar la tapa del colector dentro del tubo colector en el extremo donde se encuentre más cercano el pistón de filtrado.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

22. Deslizar el tubo del colector de filtrado sobre el sensor y sobre el imán hasta llegar a la parte superior donde se encuentra el “*pivot cap*”

23. Una vez que está montado y enroscado de forma correcta, ensamblamos la celda del colector en su base que se localiza en la parte derecha del instrumento empujándola un poco hacia arriba para que la pequeña concavidad pueda entrar fácilmente en su posición y quede fija a la celda del colector.

24. Se verifica que la parte baja del tubo esté conectado al puerto de purga y también se verifica que la manguera que va a transportar el líquido de purga este bien sumergida en el contenedor con la cantidad necesaria de agua para que no entre aire al sistema, ya que de ser así se dañaría la bomba. Generalmente el fluido para purgar es agua destilada.

25. Habiendo realizado esto, del menú principal “*MAIN MENU*” seleccionar prueba “*TEST*”

26. Ya en el menú de “*TEST*” seleccionamos purgar el sistema “*PURGE SYSTEM*”

NOTA: “*HP SUPPLY*” el suministro de gas debe estar conectado y presurizado antes de que el sistema vaya a ser purgado.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

27. Seleccionar el tiempo deseado para la purga del sistema, el tiempo por default son 5[*min*].

28. Una advertencia será desplegada en la pantalla y ésta estima la cantidad de fluido que será requerido para la purga del sistema en el tiempo seleccionado. Posteriormente se deben seguir las instrucciones para iniciar el purgado.

En la parte superior del colector por encima del pistón estará presurizado para prevenir que el pistón se desplace por encima del tubo del colector. Después la bomba comenzará a bombear el fluido para purgar dentro de las secciones bajas tanto del colector como de la celda. La celda gradualmente se irá llenando con el fluido de purgado. El ciclo de purgación se detendrá al tiempo de presionar el botón “*STOP*”.

29. Colocar un vaso o algún otro recipiente por debajo de la válvula de escurrimiento y abrir la válvula por lo menos dos veces durante la purga hasta que expulsar el aire contenido en el sistema.

30. Cuando ya no se observen salir más burbujas de aire de la válvula hay que cerrar la válvula de purga con fuerza.

PRECAUCIÓN: Un error al cerrar la válvula de purga en el colector, puede causar cálculos incorrectos el volumen de filtrado.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

31. Mantener la celda por encima de la manguera y sacudir la manguera para desplazar cualquier burbuja que se encuentre dentro de la misma.
32. Verificar si en el fluido dentro de la celda siguen saliendo burbujas de aire después de que se haya cubierto la base del núcleo de filtrado. Si es así, el tiempo de purga debe ser extendido.
33. Cuando el tiempo de purgado ha expirado y las bombas de purgado se han detenido, y se debe vaciar todo el fluido de la purga contenido dentro de la celda.
34. Estar seguro que el cojinete del soporte sigue propiamente posicionado esto es de forma plana sobre la abrazadera central.

Colocación de una muestra.

35. Colocar el calibrador de volumen sobre el borde superior de la celda con el extremo largo dentro de la celda interior.
36. Llenar la celda con la muestra con la que se va a realizar la prueba con el calibrador de volumen en el fondo. Remover el calibrador posteriormente.

Cerrado de la celda

37. Abrir la puerta jalando la parte baja del cerrojo hacia afuera y girar este aproximadamente 90° en cualquier dirección

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

38. Liberar el cerrojo de su posición de cerrado jalando este hacia afuera abriendo así la puerta.

39. Asegurarse de que la cabeza de la celda localizada en la parte superior, se encuentra limpia y esté correctamente ensamblada.

40. Asegurarse que el eje de corte o flecha se encuentre en buenas condiciones además de que se encuentre limpia.

41. Llenar el orificio del eje de corte con fluido de purga “agua destilada”. Esto limpia las manchas que pueden obstruir las lecturas del sensor de temperatura.

42. Insertar el eje de corte con la cabeza de la celda hasta que se sostenga con los imanes que lo dirigen.

43. Instalar el empaque de vapor colocado por encima del eje de corte en la parte superior de la celda. No lubricar este empaque ni la parte interior de la cabeza de la celda, esta fricción mantiene el empaque en su posición.

PRECAUCIÓN: Proporcionar una buena lubricación entre la junta de la cabeza de la celda y la celda ensamblada es muy importante. Esto facilitará su ensamble y desensamble.

44. Aplicar una capa de grasa sobre la parte exterior del extremo inferior de la manguera metálica que encaja en la tubería de la

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

celda cuando esta se encuentra instalada. Esta capa de grasa, debe extenderse aproximadamente dos centímetros y medio del punto antes mencionado.

45. Deslizar lentamente la celda sobre el eje de corte y encima de la guía. Empujarlo totalmente a la unidad del rotor. Asegurarse de que la celda se encuentra alineada con la cabeza de la celda, si esta no puede ser desplazada, el eje de corte no está bien orientado en el fondo y se debe de tratar de ensamblarlo nuevamente. Otra posible causa es que la base del eje de corte se encuentra fuera de posición
46. Sostener la celda arriba y rotarla hasta que la manija metálica en la parte baja de la celda, apunta hacia el exterior, fuera del instrumento. Se alinea aproximadamente a las ranuras en el fondo de la tapa de la celda.
47. Sostenga una vez más la celda ensamblada donde se encuentra el impulsor del rotor, libere la celda inclinando la palanca de la cerradura y balancee la celda hasta que quede fija en su lugar en la base. Alinee la manija metálica de la parte baja de la celda de modo que se ajuste con el soporte y empuje esta hacia adentro para quede correctamente instalada.

Precaución: Si la celda no es colocada de forma correcta el interruptor de seguridad evitará que se corra la prueba.

48. Cierre y asegure la puerta.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

49. Seleccione el menú de prueba “TEST MENU” del menú principal “MAIN MENU”.

50. Seleccionar ejecutar prueba “RUN TEST”. Si la prueba a realizar va a tener las mismas características que la prueba realizada anteriormente, o si la prueba a realizarse ya ha sido editada como el operador haya decidido, de lo contrario, si desea realizar algún cambio en la secuencia de la prueba debe referirse a la sección de programación de la secuencia de una prueba “PROGRAMMING TEST SEQUENCE” y después de que haya sido revisado lo anteriormente descrito y se esté seguro que tiene el procedimiento adecuado seleccionar ejecutar la prueba “RUN TEST”.

51. Se mostrará un mensaje alertando que al iniciar la prueba destruirá los resultados de la última prueba realizada. Si los datos de la última prueba desean conservarse, estos deben ser impresos y transferidos a una computadora antes de continuar para hacer esto referirse a la sección de transferir los datos a la computadora “TRANSFFERING DATA TO A COMPUTER”.

52. Cuando esté listo para comenzar la prueba presione comenzar “START” como se indica en la pantalla de advertencia.

NOTA: La prueba puede ser detenida en cualquier momento presionando la tecla “STOP”.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

53. Observar el instrumento por algunos minutos para asegurarse de que se encuentra operando de forma correcta. Se emitirá una alarma de manera intermitente hasta que el eje de corte se encuentre girando a la velocidad correcta.

Cuando haya concluido la prueba, los datos pueden ser transferidos a una computadora para que puedan ser imprimidos. Después el instrumento debe ser limpiado correctamente y se debe cerrar la conexión del gas a alta presión y apague el instrumento si este no va a usarse de inmediato.

III.VII VERIFICANDO EL VOLUMEN DE FILRADO

Una manera de cerciorarse si volumen de filtrado obtenido por el instrumento es correcto, es el compararlo con la cantidad de volumen de filtrado que se encuentra en el colector. Para realizar esta comparación, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Levante el tubo de filtrado y la tapa de entrada del filtrado hacia arriba para liberar la tapa del colector, después gírelo hacia afuera.
2. Deslice la entrada de la tapa y el tubo de filtrado hacia abajo fuera de la tapa superior del pivote.
3. Invierta el sentido en el que se encuentra e tubo de filtrando quedando así la entrada de la tapa hacia arriba.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

4. Afloje la válvula de sangrado sobre la entrada de la tapa, después empuje esta hacia afuera manteniendo el tubo vertical.
5. Vierta el filtrado fuera del tubo de filtrado en una probeta adecuada. El volumen de filtrado debe ser aproximadamente el mismo que último volumen reportado en los datos.
6. Reensamblar el tubo de filtrado junto con la tapa en la posición que se encontraba en un principio y con ello podrá verificar que el volumen medido por el instrumento fue el correcto.

III.VIII PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN

Los elementos del menú de calibración “CALIBRATION MENU” permiten cambios en algunos parámetros que no suelen ser modificados muy a menudo. La opción que con más frecuencia es utilizada es la calibración del sensor del colector de filtrado. Este procedimiento debe ser realizado cada cinco o diez pruebas. Si el instrumento ha estado en funcionamiento y los mismos procedimientos generales han sido utilizados puede que no sea necesario realizar cambio en la GEOMETRIA, TIEMPO, FECHA, y SELECCIÓN DE UNIDADES.

Para poder realizar la calibración deseada, debemos seleccionar calibración “CALIBRATE” del menú principal “MAIN MENU” y el menú de calibración “CALIBRATE MENU” será desplegado en pantalla. Lo siguiente, es una breve descripción de cada una de las opciones desplegadas.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

1. **SELECT UNITS** “Selección de unidades”: Del menú de calibración “CALIBRATE MENU”, seleccionar la opción de seleccionar unidades “SELECT UNITS” y seleccionar cualquiera de las dos opciones que se encuentran INTERNATIONAL “internacional” (SI) o ENGLISH ENGINEERING “sistema inglés”. El internacional (SI) mostrará la temperatura en grados centígrados [°C], la presión en kilo pascales [Kpa], la longitud en centímetros [cm], el volumen de filtrado en milímetros [ml] y la velocidad de filtrado en milímetros por segundo por metro cuadrado [ml*s / m²]

El sistema inglés mostrará la temperatura en grados Fahrenheit [°F], la presión en libras por pulgada cuadrada [psi], la longitud en pulgadas [pg] y para el volumen de filtrado como para la velocidad de filtrado las unidades son las mismas que en el sistema internacional.

2. **SET TIME/DATE** “Selección de hora y fecha”: Del menú de calibración “CALIBRATE MENU” seleccionar SET TIME/DATE y siga las instrucciones para seleccionar la fecha y hora correctas. La fecha se introduce con el formato de mes, día y año con dos dígitos cada una. La hora es introducida en un formato de 24hrs en el orden de hora, minutos y segundos con dos dígitos cada uno.
3. **SET GEOMETRY** “Selección de geometría”: Del menú de calibración “CALIBRATE MENU”, seleccionar “SET GEOMETRY” y estando en el menú de geometría seleccionar la dimensión que necesita ser modificada, las opciones son: Diámetro del eje de corte, Diámetro interior del núcleo, longitud del núcleo y el tamaño medio de poro del núcleo de filtrado. Las primeras tres dimensiones son utilizadas por el instrumento para calcular la velocidad del eje de corte requerida para alcanzar velocidad de corte requerida. La media del tamaño de poro es solo usada con propósitos de información de los resultados.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

4. **CALIBRATE COLLECTOR SENSOR** “Calibración del sensor del colector”: Partiendo del menú de calibración “CALIBRATE MENU”, seleccionar “CALIBRATE COLLECTOR SENSOR”. El sensor es calibrado en dos lapsos de tiempo uno cuando se encuentra vacío y el otro cuando se encuentra con 45.05 [ml]. Y este volumen es simulado utilizando una barra metálica. Debe haber presión disponible en el instrumento para este procedimiento. El colector de filtrado debe estar ensamblado y en su posición normal.

Y para realizar la calibración de volumen mediante el uso de la barra metálica es necesario seguir el siguiente procedimiento:

- a) Abrir la válvula de sangrado por lo menos dos veces.
- b) Levantar y girar el tubo colector y retirar la tapa de entrada fuera del soporte que la sostiene.
- c) Sosteniendo el tubo del colector sobre su soporte superior en la tapa del pivote remover la tapa inferior donde se encuentra la entrada.
- d) Asegurarse que el pistón de filtrado se encuentra en el tubo del colector.
- e) Inserte el calibrador de volumen en el fondo del tubo del colector. Este debe ser colocado por debajo del pistón de modo que este sostenga al pistón por encima de la tapa del colector.
- f) Vuelva a colocar la tapa con entrada del colector en el fondo del tubo del colector y balancee este nuevamente a su posición original ensamblándolo como se encontraba en un principio.
- g) Presione cualquier tecla para continuar. El colector será presurizado, forzando al pistón de filtrado hacia abajo

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

sobre el calibrador de volumen. Después de pocos segundos el instrumento ventilará la presión.

- h) Después de que el colector haya terminado de ventilar, siga el mensaje y remueva el calibrador de volumen del tubo del colector. Después de unos pocos segundos el instrumento ventilará la presión.
- i) Presionar cualquier tecla para continuar. Una vez más el colector deberá ser presurizado, forzando al pistón de filtrado a desplazarse hacia el fondo del tubo del colector. Después de unos pocos segundos el instrumento ventilará el colector. Y la pantalla regresará al menú de calibración y de esta forma la calibración del sensor del colector ya se habrá llevado a cabo.

III.IX TRANSFERENCIA DE DATOS A LA COMPUTADORA

Los datos del FANN 90 son transmitidos en un formato que puede ser importado a hojas de cálculo en diferentes programas populares. También el FANN 90 puede conectarse a una impresora para imprimir directamente los resultados.

Los siguientes pasos que se enlistan a continuación son empleados para transferir los datos a una computadora.

1. Antes de conectar los equipos verificar que tanto el FANN 90 como la computadora estén apagados.
2. Conectar el cable especial en la parte inferior derecha del instrumento en la entrada etiquetada como "COMPUTER" y el otro extremo a la computadora personal.
3. Encender la computadora y el FANN 90.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

4. Correr el programa estándar de comunicación en la computadora. Este tipo de programa es similar al que se utiliza para establecer comunicación con un modem. Un programa que funciona de forma correcta es el PROCOMM PLUS (Datastrom Technologies, Inc.). Configurar el programa de la siguiente manera.
5. Del menú de acceso de datos "DATA ACCES MENU" del FANN 90 seleccionar "DOWNLOAD-RS232:9600,N,8 1"
6. Un mensaje aparecerá que indicará que se presione en el modelo 90 la tecla "START" o "Ctrl Q" desde la computadora.
7. En la computadora para descargar los datos ASCII. Con el programa Proccom esto se realiza mediante la tecla de "PAGE DOWN". Y un nombre deberá ser asignado para poder identificar la información guardada.
8. Presione "Ctrl Q" en la computadora o la tecla "START" en el FANN 90, los datos serán desplegados en la pantalla de la computadora esto toma menos de un minuto.
9. Cerrar la carpeta o el archivo que fue abierto en el modelo 90 con el programa Proccom esto se realiza presionando la tecla "Esc" escape.

Esto completa la transferencia. La información será guardada en la memoria del FANN 90 hasta que se ejecute otra prueba o hasta que se ejecute el procedimiento de ventilación y enfriamiento "COOL DOWN AND VENT".

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

En este capítulo, se muestran los resultados obtenidos al aplicar el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua descrito en el capítulo anterior.

Para realizar el análisis de resultados, es necesario conocer y aplicar ciertos conceptos que se describen a continuación; además, se recomienda seguir la metodología sugerida para detectar fácilmente los factores que pueden alterar los resultados en dicha medición.

IV.1 EL MESURANDO Y LA INCERTIDUMBRE

Cabe mencionar que el propósito de una medición, es determinar el valor de una magnitud llamada “mesurando” que de acuerdo a VIM³², es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. Para fines del presente trabajo, el mesurando se refiere al filtrado obtenido en cada una de las pruebas realizadas.

La imperfección natural en la realización de las mediciones, hace imposible conocer con certeza absoluta el valor verdadero de una magnitud. Toda medición lleva implícita una incertidumbre que de acuerdo al VIM, es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mesurando.

Una definición completa del mesurando incluye especificaciones sobre las magnitudes de entrada relevantes. El término magnitud de entrada se usa para denotar también magnitudes de influencia.

El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mesurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. La

incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas.

Algunas contribuciones son inevitables por la definición del propio mesurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionado para la medición.

En el resultado de la medición y por consiguiente también en la incertidumbre, pueden influir algunos atributos no cuantificables. En cuyo caso, siempre es recomendable reducir en lo posible esos efectos, preferentemente haciendo uso de criterios de aceptación en las actividades tendientes a reducir tales efectos.

El principio de medición es el fundamento científico usado para realizar una medición. El conocimiento del principio de medición, permite al metrólogo dominar la medición esto es, modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia, etc., además es indispensable para estimar la incertidumbre de la medición.

El método de medición y el procedimiento de medición son descripciones de la manera de llevar a cabo una medición, la primera es genérica y la segunda específica.

El principio, el método y el procedimiento de medición son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Un conocimiento insuficiente de ellos, muy probablemente conducirá a una estimación equivocada o incompleta en el mejor de los casos.

IV.II MODELO FÍSICO

Pretender estudiar el proceso de medición de manera exacta y completa está usualmente fuera de las actividades rutinarias del metrólogo, más aún, es el propósito de la investigación científica, cuya solución pocas veces se vislumbra. Por lo tanto, es necesaria la simplificación del fenómeno o de la situación real, conservando las características más relevantes para el propósito pretendido mediante la construcción de un modelo para la medición.

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mesurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Estas suposiciones usualmente incluyen:

- Relaciones fenomenológicas entre variables.
- Consideraciones sobre el fenómeno como conservación de cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías.
- Consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.

Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que lo aproxima al proceso real.

IV.III MODELO MATEMÁTICO

El modelo físico ya definido, se representa por un modelo descrito en lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas.

Considerando la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto $\{X_i\}$ expresión en la cual el índice i toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada N .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mesurando Y con la magnitud de salida se representa como una función.

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.1)}$$

Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc.

El mejor estimado Y del valor del mesurando es el resultado del calcular el valor de la función f evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada x_i ,

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.2)}$$

En algunas ocasiones se toma el mejor estimado de Y como el promedio de varios valores y_j del mesurando obtenidos a partir de diversos conjuntos de valores $\{x_i\}_j$ de las magnitudes de entrada.

IV.IV IDENTIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE INCERTIDUMBRE

Habiendo sido determinados el mesurado, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identificarán las posibles fuentes de incertidumbre.

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.
- La repetitividad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como resolución, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mesurando.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

Siempre estarán presentes efectos que la experiencia, conocimientos y actitud crítica del metrólogo permitan calificar como irrelevantes y relevantes después de las debidas consideraciones.

Para los fines del presente trabajo consideraremos la incertidumbre por la repetibilidad de las lecturas que es la más importante a consideración de la experiencia del metrólogo.

IV.V CUANTIFICACIÓN

En la literatura, se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre, *el método de evaluación tipo A* que está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras que el *método de evaluación tipo B* comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre.

Cabe mencionar que en esta clasificación, no define alguna diferencia en la naturaleza de los componentes que resultan de cada uno de los dos tipos de evaluación, puesto que ambos tipos están basados en distribuciones de probabilidad. La única diferencia, es que una evaluación tipo A se estima basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición; mientras que en el caso de la evaluación tipo B se supone una distribución con base en la experiencia o información externa al metrologo.

➤ Evaluación tipo A

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$, el mejor estimado x_i para el valor de X_i es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n q_j \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.3)}$$

La dispersión de los resultados de la medición $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ para la magnitud de entrada X_i se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.4)}$$

La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.5)}$$

Así que resulta para incertidumbre estándar de X_i .

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.6)}$$

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es necesario suponer que la distribución (dispersión) de los q_j no cambia, o sea se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas en diferentes días, por diferentes metrólogos, etc. (esto es, la medición está bajo control estadístico).

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de repeticiones n , ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición en específico. Hay que considerar que:

- Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre por repetibilidad, la cual es proporcional a $1/\sqrt{n}$.
- Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes con el tiempo.

- En pocos casos se recomienda y se requiere n mayor de 10. Por ejemplo cuando se caracterizan f o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud.

➤ Evaluación tipo B

En una evaluación tipo B de la incertidumbre de una magnitud de entrada, se usa información externa u obtenida por experiencia. Las fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Este tipo B de evaluación, será empleada para fines de cálculo de la incertidumbre que es la referida a manuales de instrumentos de medición.

IV.VI DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD

La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen con más frecuencia son:

➤ **Distribución normal**

Los resultados de una medición repetida afectada por magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en una buena aproximación a una distribución normal. En particular, la distribución de la media de una serie de mediciones repetidas se aproxima a una normal independiente de la distribución de las lecturas individuales. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.

➤ **Distribución Rectangular**

En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. En general cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

➤ **Distribución Triangular**

Si además del conocimiento de los límites superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para los valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.

➤ **Otras Distribuciones**

Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios adyacentes.

Dado a que el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua presenta la misma función de densidad de probabilidad a lo largo de toda la prueba y además presenta los mismos intervalos de tiempo, es conveniente emplear la distribución rectangular de probabilidad.

IV.VII DISTRIBUCIÓN RECTANGULAR DE PROBABILIDAD

Como ha sido mencionado, en una distribución rectangular cada valor de x dentro del intervalo $[a_-, a_+]$ tiene la misma probabilidad, o sea la densidad de probabilidad $p(x)$ es constante:

$$p(x) = \begin{cases} 1/a & \text{para } a_- \leq x \leq a_+ \\ 0 & \text{para } x < a_- \text{ y } x > a_+ \end{cases} \quad \text{donde } a = a_+ - a_-$$

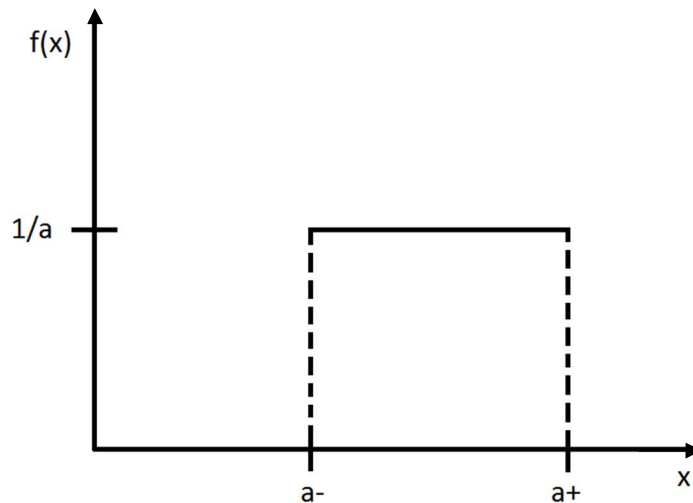


Fig. 4.1 Gráfica de la función de densidad de probabilidad rectangular

Para calcular la desviación estándar (experimental) de una serie de datos $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, se emplea la ecuación 16:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.7)}$$

El cuadrado de la desviación estándar s^2 es llamado varianza. Si el número de datos n es muy grande y si los datos están distribuidos de manera continua, la suma puede ser sustituida por una integral, y se obtiene la varianza como:

$$s^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^2 \cdot p(x) dx \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.8)}$$

Donde $p(x)$ es la función de densidad de probabilidad de X_i y \bar{x} es la media de los datos

$$\bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p(x) dx \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.9)}$$

Para la distribución rectangular la media resulta:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \int_{a_-}^{a_+} x \cdot \frac{1}{a} dx = \frac{1}{a} \cdot \frac{x^2}{2} \Big|_{a_-}^{a_+} = \frac{1}{2a} \cdot (a_+ - a_-)(a_+ + a_-) = \\ &= \frac{1}{2a} \cdot a \cdot (a_+ + a_-) = \frac{(a_+ + a_-)}{2} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.10)} \end{aligned}$$

La varianza s^2 se calcula:

$$\begin{aligned}
 s^2 &= \int_{a_-}^{a_+} (x - \bar{x})^2 \cdot \frac{1}{a} dx = \frac{1}{a} \cdot \frac{(x - \bar{x})^3}{3} \Bigg|_{a_-}^{a_+} = \frac{1}{3a} [(a_+ - \bar{x})^3 - (a_- - \bar{x})^3] \\
 &= \frac{1}{3a} \cdot \left[\left(\frac{a}{2}\right)^3 - \left(-\frac{a}{2}\right)^3 \right] = \frac{1}{3a} \cdot \frac{a^3}{4} \\
 &= \frac{a^2}{12} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.11)}
 \end{aligned}$$

La desviación estándar finalmente resulta:

$$s = \frac{a}{\sqrt{12}} = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.12)}$$

Cómo se mencionó anteriormente, la estimación y la expresión de la incertidumbre de la medición del mesurando, solo será considerada en base a la reproducibilidad interna en las repeticiones de las pruebas.

La expresión matemática que representa esta estimación de la incertidumbre en base a la desviación estándar de la reproducibilidad interna es:

$$RSD_r = \sqrt{\frac{\sum[(a_+ - a_-)/\bar{x}_i]^2}{2n}} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.13)}$$

Donde:

- RSD_r = Desviación estándar relativa de repetibilidad
- a_+ y a_- = Valores de mediciones duplicadas en la misma muestra
- n = Número de parejas de datos de los duplicados de varias muestras
- \bar{x}_i = Media, valor medio de la pareja de valores del duplicado.

IV.VIII INCERTIDUMBRE EXPANDIDA

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

IV.VIII.I Factor de cobertura y nivel de confianza

La incertidumbre estándar μ_c tiene un valor igual a la desviación estándar de la función de distribución del mesurando. El intervalo centrado en el mejor estimado del mesurando contiene el valor verdadero con una probabilidad p de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mesurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor de 68%, lo que se tiene expandiendo este intervalo por un factor k , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida U .

$$U = k \cdot \mu_c \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.14)}$$

La incertidumbre expandida U indica entonces un intervalo, llamado *intervalo de confianza*, que representa una fracción p de los valores que puede probablemente tomar el mesurando. El valor de p es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

La relación entre el factor de cobertura k y el nivel de confianza p depende de la distribución de probabilidad del mesurando. Para el caso de la distribución rectangular de probabilidad, se tiene un nivel de

confianza de 57.74% si el factor de cobertura es de 1 osea que $p=57.74\%$ para $k=1$ y si se desea un nivel de confianza de 95.45% se requiere un factor de cobertura de 2 esto es $p=95.45\%$ si $k=2$.

Finalmente, la expresión empleada para el cálculo de la incertidumbre expandida se expresa como:

$$U = k \cdot RDS_r \cdot c \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.15)}$$

Donde:

U = Incertidumbre expandida de la medición.

RDS_r = Desviación estándar de reproducibilidad interna.

c = Representa el valor de un resultado de la prueba.

k = Factor de cobertura, comúnmente 2 para un nivel de confianza de confianza de aproximadamente de 95.45%.

IV.IX RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.

Antes de enlistar los resultados experimentales de la pérdida de filtrado dinámico, es importante estudiar el comportamiento reológico del fluido que fue empleado en la realización de las pruebas. Para fines comparativos, se emplearon dos tipos de fluidos cuyos resultados se muestran a continuación.

Las lecturas fueron obtenidas por medio del viscosímetro de lodos para cada una de las velocidades de corte disponibles. Con base en estos resultados, se procedió a obtener el cálculo del punto de cedencia, viscosidad plástica y se graficó velocidad de corte contra

esfuerzo cortante para cada uno de los modelos reológicos descritos en el capítulo I.

Para fines informativos, se proporcionan las formulaciones empleadas para la elaboración de los fluidos de perforación que fueron usados en la elaboración de las pruebas de filtrado dinámico.

IV.IX.I Formulación y Reología de los fluidos A y B empleados en las pruebas de filtrado dinámico

Formulación del fluido A:

Bentonita 60 [gr/lit], FCL (controlador de pérdida de filtrado) 20 [gr/lit], CMC LV (viscosificante carboximetil celulosa) 3 [gr/lit], simulación de sólidos generados por la perforación 180[gr/lit] empleando mormorillonita calcificada, sosa cáustica para ajustar a un ph de 9.5, polímero A1 para alta presión y para alta temperatura 4[gr/lit], polímero A2 para alta presión y para alta temperatura 5.5 [gr/lit], y finalmente barita 100[gr/lit]

Formulación del fluido B:

Bentonita 60 [gr/lit], FCL (controlador de pérdida de filtrado) 20 [gr/lit], CMC LV (viscosificante carboximetil celulosa 3) [gr/lit], simulación de sólidos generados por la perforación 180[gr/lit] empleando mormorillonita calcificada), sosa cáustica para ajustar a un ph de 9.5, polímero B1 para alta presión y para alta temperatura 3[gr/lit], polímero A2 para alta presión y para alta temperatura 4 [gr/lit], y finalmente barita 80[gr/lit]

Tabla 4.1. Lecturas obtenidas por el viscosímetro rotacional para el fluido A y B empleados en las pruebas de filtrado dinámico. Temperatura = 65.5°C y PH = 9.5.

Velocidad del viscosímetro	Fluido A	Fluido B
	Densidad del lodo= 1.69 gr/cm ³	Densidad del lodo= 1.23 gr/cm ³
	Lectura en [lb/100ft ²]	Lectura en [lb/100ft ²]
600rpm	130	76
300rpm	74	43
200rpm	53	32
100rpm	31	18
6rpm	4	3
3rpm	2	2
Gel 10 seg	3	2
Gel 10 min	8	5

De la ecuación 1.2 y 1.3 obtenemos la viscosidad plástica y el punto de cedencia.

Viscosidad plástica:

$$Vp_{\text{viscosidad plástica fluido A}} = \theta_{600} - \theta_{300} = 130 - 74 = \mathbf{56 [lb/100ft^2]}$$

$$Vp_{\text{viscosidad plástica fluido B}} = \theta_{600} - \theta_{300} = 76 - 43 = \mathbf{33 [lb/100ft^2]}$$

Punto de cedencia:

$$Yp_{\text{punto cedente fluido A}} = 2 \cdot \theta_{300} - \theta_{600} = 2(74) - 130 = \mathbf{18 [lb/100ft^2]}$$

$$Yp_{\text{punto cedente fluido B}} = 2 \cdot \theta_{300} - \theta_{600} = 2(43) - 76 = \mathbf{10 [lb/100ft^2]}$$

Tabla 4.2. Resultados de los modelos reológicos sobre el fluido A.

Velocidad del viscosímetro [rpm]	Velocidad de corte [seg ⁻¹]	Modelo plástico de Bingham	Ley de Potencias	Ley de Potencias Modificado
		Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]	Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]	Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]
3	5.1	19.80	1.76	3.58
6	10.2	20.40	3.08	4.81
100	170.3	39.13	30.32	30.95
200	340.6	59.05	53.24	53.44
300	510.9	78.97	74.01	74.01
600	1021.8	138.74	129.98	129.98

Tabla 4.3. Resultados de los modelos reológicos sobre el fluido B.

Velocidad del viscosímetro [rpm]	Velocidad de corte [seg ⁻¹]	Modelo plástico de Bingham	Ley de Potencias	Ley de Potencias Modificado
		Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]	Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]	Esfuerzo cortante [lbf/100pie ²]
3	5.1	11.02	0.98	2.81
6	10.2	11.37	1.73	3.47
100	170.3	22.41	17.45	18.09
200	340.6	34.15	30.83	31.04
300	510.9	45.89	43.01	43.01
600	1021.8	81.11	75.99	75.99

Graficando velocidad de corte contra esfuerzo cortante obtenemos:

Fig. 4.2. Gráfica de la velocidad de corte vs esfuerzo cortante para el fluido A.

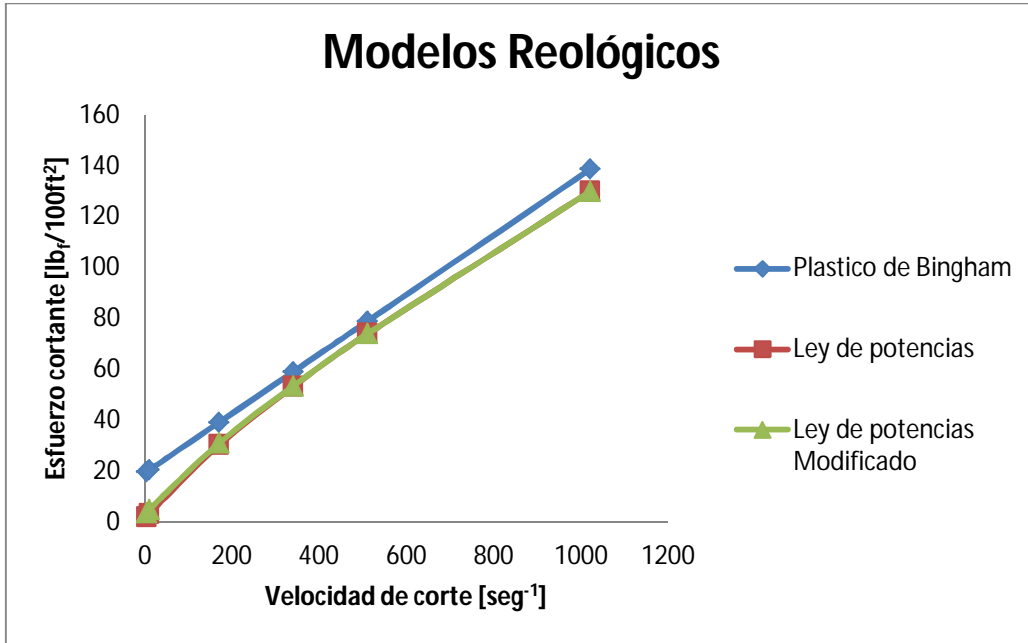


Fig. 4.3. Gráfica del log velocidad de corte vs log esfuerzo cortante para el fluido A.

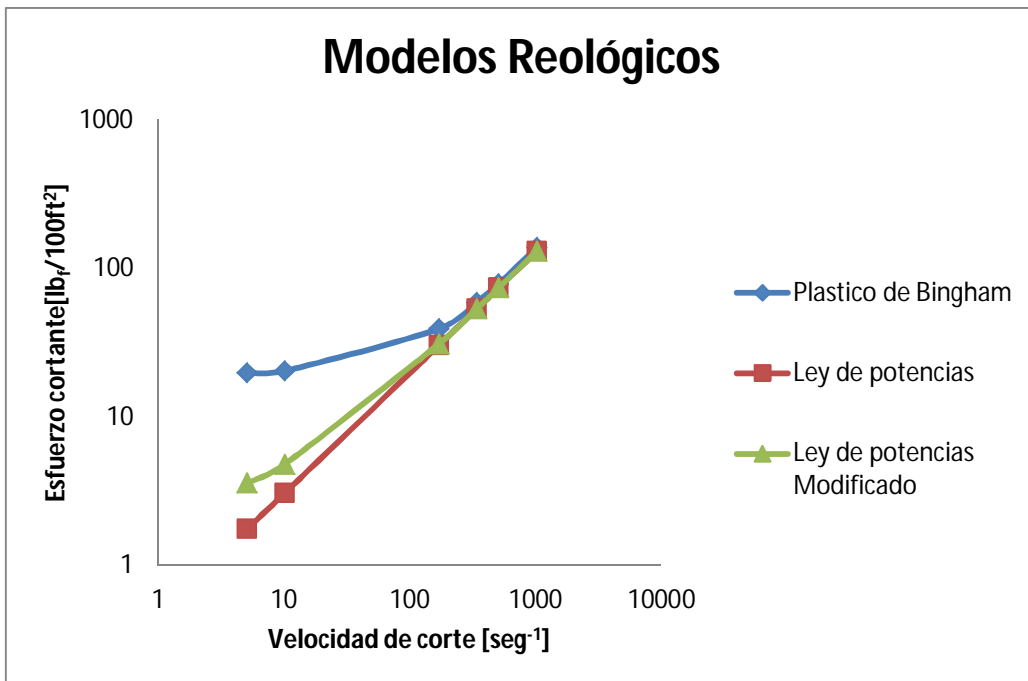


Fig. 4.4. Gráfica de la velocidad de corte vs esfuerzo cortante para el fluido B.

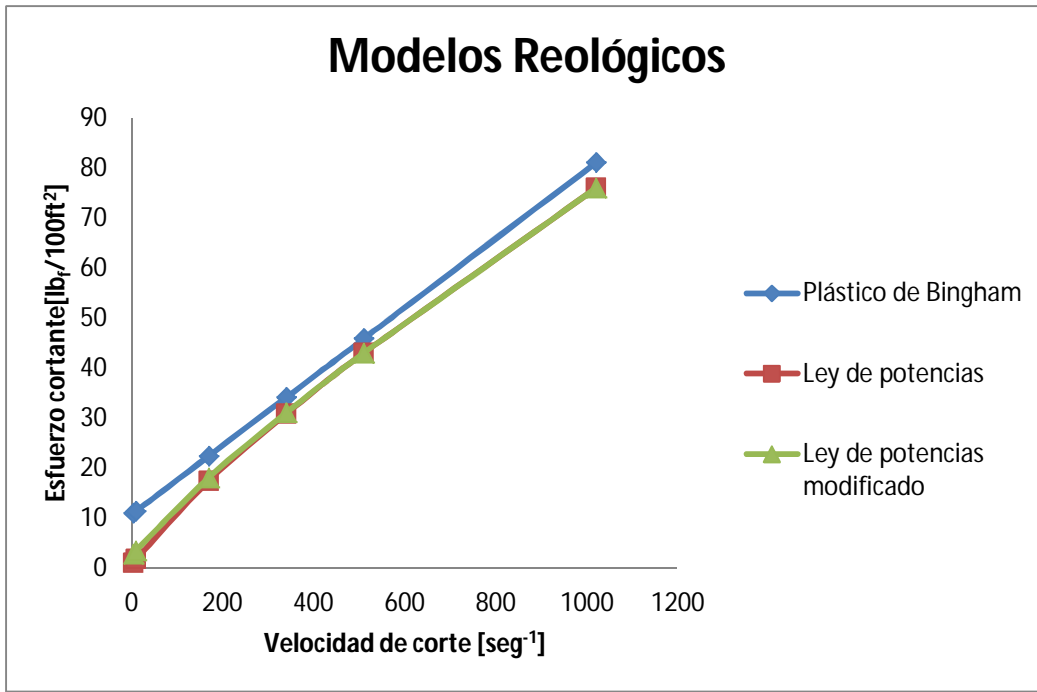
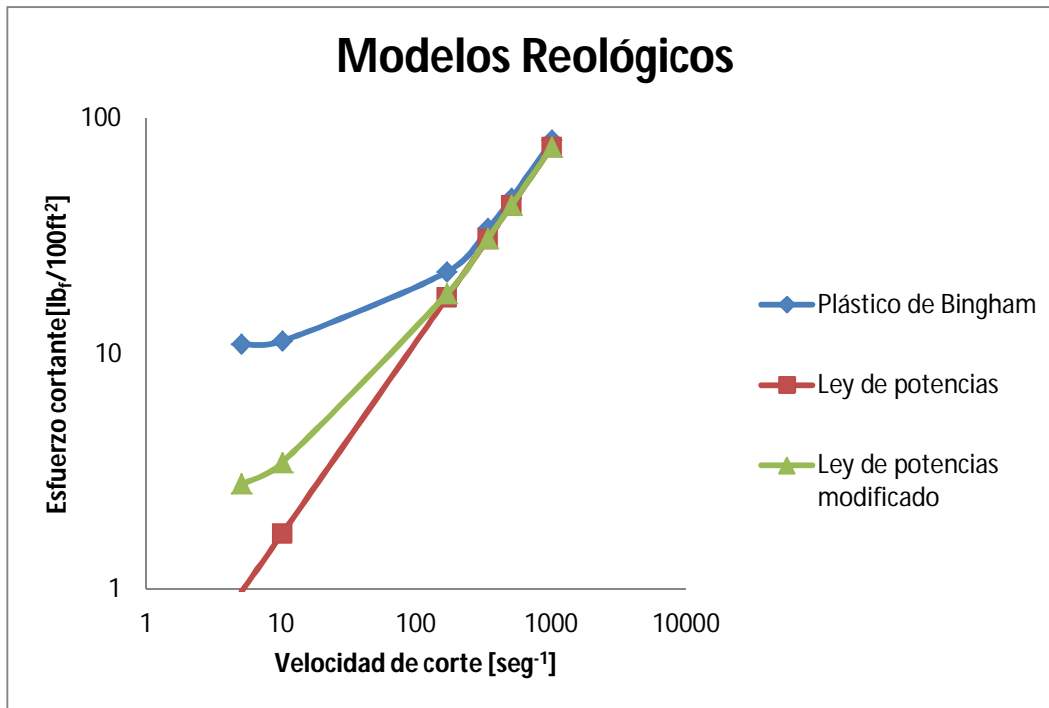


Fig. 4.5. Gráfica del log velocidad de corte vs log esfuerzo cortante para el fluido B.



IV.IX.II Resultados del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

Las pruebas fueron programadas para correrse a una temperatura de 300°F que son aproximadamente 149°C, la presión diferencial programada para las pruebas fue de 500[psi] que son aproximadamente 35 [kg/cm²], una velocidad de corte de 100[rpm] el medio de filtrado empleado en las pruebas, fueron discos de 35 [micrones] de promedio de garganta media de poro, que en base a la tabla proporcionada por Fann es equivalente a una permeabilidad de 5.5 [D].

Tabla 4.4. Resultados del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua para los fluidos A y B

	Fluido A	Fluido B
Tiempo de filtrado	Volumen de filtrado en [ml]	Volumen de filtrado en [ml]
Spurt Loss	8	15
15 [min]	8.8	32
30 [min]	3.6	12
Volumen acumulado de filtrado[ml]	20.4	59
Espesor den enjarre [cm]	4	4
Características del filtrado	Lodo y filtrado	Lodo

Temperatura=149°C, Presión diferencial=35[kg/cm²] y Núcleo sintético de 35[micrones] =5.5 [D] y una velocidad de corte de 100[rpm]

Como se puede ver en los resultados de la tabla 4.4, el filtrado dinámico en la prueba con fluido A, presenta un menor volumen acumulado de filtrado que la prueba con el fluido B, esto es debido a que el enjarre que se formó en la prueba del fluido A fue consolidado de mejor forma que el enjarre formado con el fluido B.

Este análisis se puede ver reflejado por las características del filtrado para cada una de las pruebas. El filtrado obtenido para la prueba con el fluido A, presentó lodo solo durante el spurt loss y posteriormente presentó exclusivamente filtrado. En cambio, el filtrado obtenido en la prueba con el fluido B presentó lodo durante toda la prueba.

Fig. 4.6. Gráfica del resultado del filtrado dinámico obtenido para el fluido A.

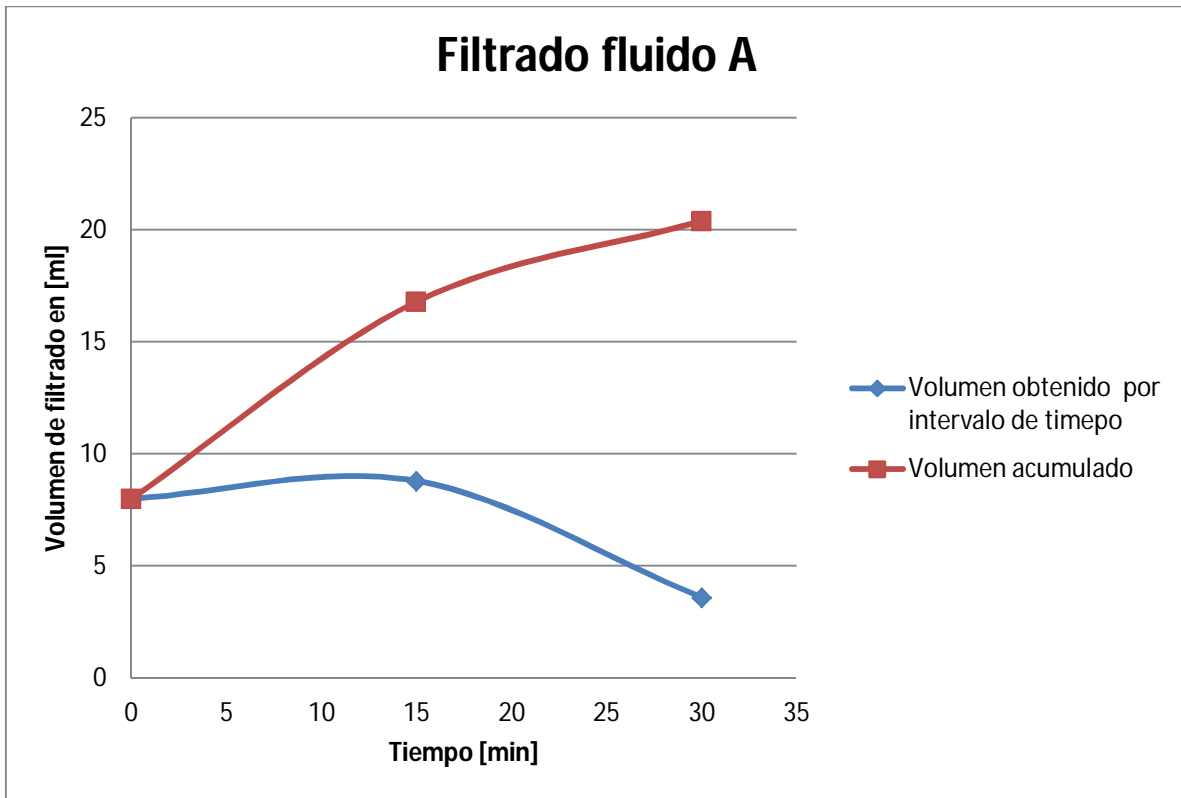
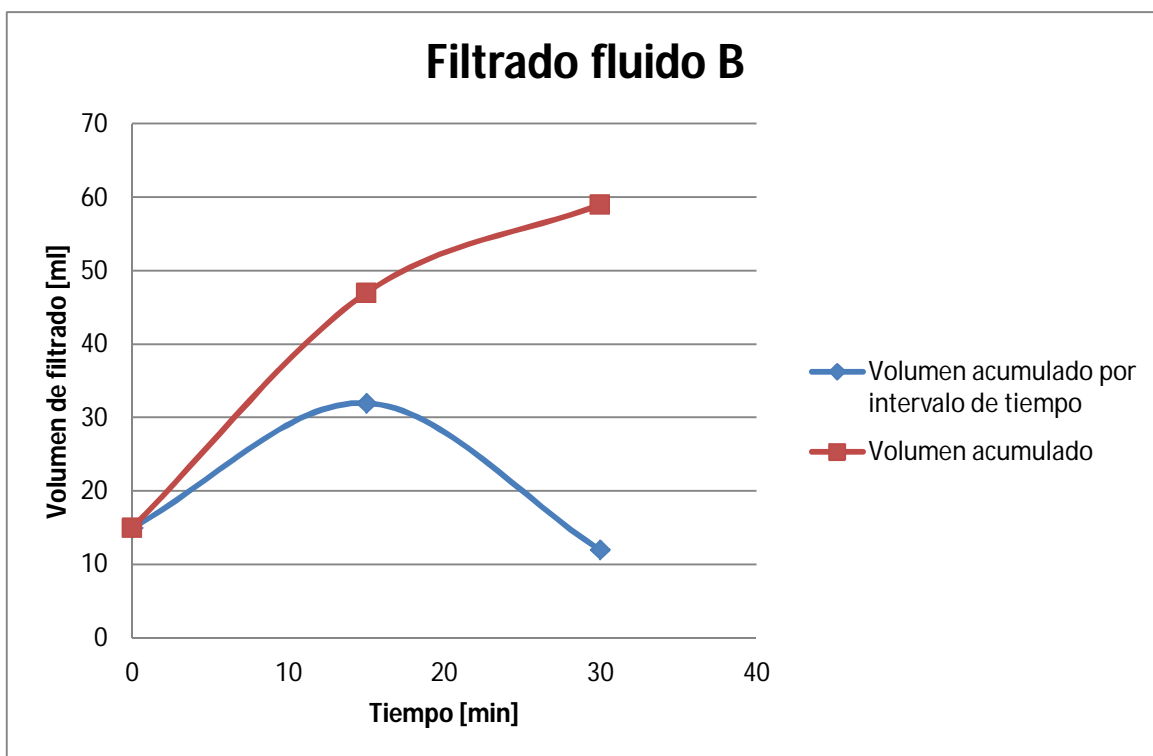


Fig. 4.6. Gráfica del resultado del filtrado dinámico obtenido para el fluido B.



La incertidumbre en las lecturas del mesurando generada durante la realización del método, se presenta en la repetibilidad del método. Por ello, es necesario realizar varias repeticiones del método de prueba bajo las mismas condiciones de operación para obtener la variación en el resultado del mesurando.

Las demás fuentes de incertidumbre que se mencionaron en el punto IV.IV del presente capítulo, no generan alteraciones significantes en el valor del mesurando por lo tanto no son determinadas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en las repeticiones del método de prueba para cada uno de los fluidos. Se consideró un número de repetición igual a diez, que es el mínimo número de veces que se debe repetir la prueba para obtener un resultado confiable de la incertidumbre de la medición.

Tabla 4.5 Resultados de las repeticiones del método de prueba para los fluidos A y B.

Número de medición	Resultado a _i del fluido A [ml]	Resultado b _i del fluido A [ml]	Resultado a _i del fluido B [ml]	Resultado b _i del fluido B [ml]
1	8.8	8.7	32	32.2
2	8.9	8.8	32.3	31.5
3	8.7	8.8	32	31.5
4	8.7	8.8	31.7	31.5
5	8.7	8.9	32.5	32.2
6	8.8	8.9	32.2	32
7	8.8	8.9	31.5	32
8	8.9	8.8	31.8	31.5
9	8.8	8.7	32	31.5
10	8.7	8.8	32.1	31.5

En las tabla 4.5 se observan los resultados en las columnas a_i y b_i cada dato que se encuentra en estas columnas representa un resultado del método de prueba con su debida repetición (a_i, b_i) para cada uno de los fluidos empleados.

Con los resultados obtenidos en la tabla 4.5 se procede a obtener la desviación estándar relativa de repetibilidad para cada uno de los fluidos empleando la ecuación 4.13

$$RSD_r = \sqrt{\frac{\sum[(a_+ - a_-)/\bar{x}_i]^2}{2n}} \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.13)}$$

Tabla 4.6 Desviación estándar relativa de repetibilidad del fluido A.

Número de medición	Media (a _i +b _i)/2	(a _i -b _i)/media	[(a _i -b _i)/media] ²
1	8.75	0.01143	1.3061E-04
2	8.85	0.01130	1.2768E-04
3	8.75	0.01143	1.3061E-04
4	8.75	0.01143	1.3061E-04
5	8.8	0.02273	5.1653E-04
6	8.85	0.01130	1.2768E-04
7	8.85	0.01130	1.2768E-04
8	8.85	0.01130	1.2768E-04
9	8.75	0.01143	1.3061E-04
10	8.75	0.01143	1.3061E-04

$$\sum[(a_+ - a_-)/\bar{x}_i]^2 = 0.00168 \quad n = 10$$

$$\therefore RSD_{rA} = \sqrt{\frac{0.00155}{2(10)}} = 0.009166$$

Tabla 4.7 Desviación estándar relativa de repetibilidad del fluido B.

Número de medición	Media (a _i +b _i)/2	(a _i -b _i)/media	[(a _i -b _i)/media] ²
1	32.1	0.00623	3.8819E-05
2	31.9	0.02508	6.2892E-04
3	31.75	0.01575	2.4800E-04
4	31.6	0.00633	4.0058E-05
5	32.35	0.00927	8.5999E-05
6	32.1	0.00623	3.8819E-05
7	31.75	0.01575	2.4800E-04
8	31.65	0.00948	8.9845E-05
9	31.75	0.01575	2.4800E-04
10	31.8	0.01887	3.5600E-04

$$\sum[(a_+ - a_-)/\bar{x}_i]^2 = 2.0225E - 03 \quad n = 10$$

$$\therefore RSD_{r_B} = \sqrt{\frac{0.002022}{2(10)}} = 0.010054$$

Posteriormente calculamos la incertidumbre expandida apoyándonos en la ecuación 4.15 presentada en el presente capítulo. Considerando un factor de cobertura igual a 2 para tener un nivel de confianza de aproximadamente 95%:

$$U = k \cdot RDS_r \cdot c \dots \dots \dots \text{Ecuación (4.15)}$$

Para el fluido A obtenemos:

$$U_1 = 2 \cdot 0.008803 \cdot 8.8$$

$$U_1 = 0.16 \text{ [ml]}$$

Para el fluido B obtenemos:

$$U_2 = 2 \cdot 0.010056007 \cdot 31.9$$

$$U_2 = 0.64 \text{ [ml]}$$

Esto quiere decir que el resultado obtenido en la medición del mesurando presentará una incertidumbre de ± 0.16 [ml] para el fluido A y de ± 0.64 [ml] para el fluido B.

Nota: Los valores de 8.8 [ml] y de 31.9 [ml] para los fluidos A y B, son los valores de filtrado que se emplearon como blancos para la realización de los cálculos estadísticos. Ya que como bien es sabido, no existe un fluido estándar que pueda servir de referencia para llevar a cabo los cálculos pertinentes. Por ello, fue necesario emplear lodos de control de calidad mediante la generación de un *stock*³³ y así pudiera servir de referencia y llevar a cabo los cálculos estadísticos.

VALIDACIÓN DEL MÉTODO DE PRUEBA

El objetivo de este capítulo, es verificar y sustentar que el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua sea validado o no validado. Para ello, es necesaria la descripción de la metodología en la validación de métodos que será definida a continuación en el presente capítulo.

Una validación, es una confirmación mediante examen y suministro de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico previsto. Así lo define [ISO8402:1994].

V.1 Definición de validación de un método.

Es el proceso de verificación para confirmar si un método es adecuado a su propósito, o sea, para resolver un problema analítico en particular. Esto se puede interpretar como la manera de confirmar que el método en cuestión tiene capacidades de desempeño consistentes con las que requiere la aplicación.

En el proceso de validación del método, está implícito que los estudios para determinar los parámetros de desempeño se realizan utilizando equipos dentro de especificaciones, que están trabajando correctamente y que están calibrados correctamente. Asimismo, el operador que realiza los estudios debe ser técnicamente competente en el campo de trabajo bajo estudio y debe poseer suficiente conocimiento sobre el trabajo a realizar con el fin de que sea capaz de tomar decisiones apropiadas a partir de las observaciones hechas mientras avanza el estudio.

Generalmente se considera que la validación de un método está ligada estrechamente con el desarrollo del método. De hecho, no es posible

determinar exactamente donde termina el desarrollo del método y donde empieza la validación. Por lo general, muchos de los parámetros de desempeño del método que están asociados a su validación son evaluados por lo menos de forma aproximada como parte del desarrollo del método.

V.II ¿Por qué deben validarse los métodos?

Millones de mediciones analíticas se realizan diariamente en miles de laboratorios alrededor del mundo. Hay innumerables razones para realizar esas mediciones y el costo por realizarlas es elevado surgiendo costos adicionales de las decisiones tomadas en base a los resultados. Por ello, es muy importante determinar un resultado correcto y ser capaz de determinar que así lo es.

Si el resultado de una prueba no es confiable entonces tiene poco valor y la prueba no debió haberse realizado así. Para que el resultado analítico concuerde con el propósito requerido, debe ser lo suficientemente confiable para que cualquier decisión basada en éste pueda tomarse con confianza. Así, el desempeño del método debe validarse y debe estimarse la incertidumbre del resultado a un nivel de confianza dado. La incertidumbre deberá ser evaluada y establecida de una forma que sea ampliamente reconocida, consistente de forma interna y fácil de interpretar. La mayor parte de la información requerida para evaluar la incertidumbre se puede obtener durante la validación del método.

V.III ¿Cuándo deben validarse los métodos?

Un método debe validarse cuando sea necesario verificar que sus parámetros de desempeño son adecuados para el uso de un problema analítico específico. Por ejemplo:

- Cuando un nuevo método sea desarrollado para un problema específico.
- Cuando un método ya establecido es revisado para incorporar mejoras o para extenderlo a un nuevo problema.
- Cuando el control de calidad indica que un método ya establecido está cambiando con el tiempo.
- Cuando un método establecido es usado en un laboratorio diferente o con diferentes analistas o con una diferente instrumentación;
- Para demostrar la equivalencia entre dos métodos, por ejemplo, entre un método nuevo y uno de referencia.

El alcance de la validación o de la revalidación requerida, dependerá de la naturaleza de los cambios hechos al aplicar un método a diferentes laboratorios, instrumentación, operadores y circunstancias en la cuales el método va ser utilizado. Siempre es apropiado algún grado de validación, aun cuando se usan métodos aparentemente bien caracterizados ya sean de referencia o publicados.

V.IV Objetivos de la validación de un método.

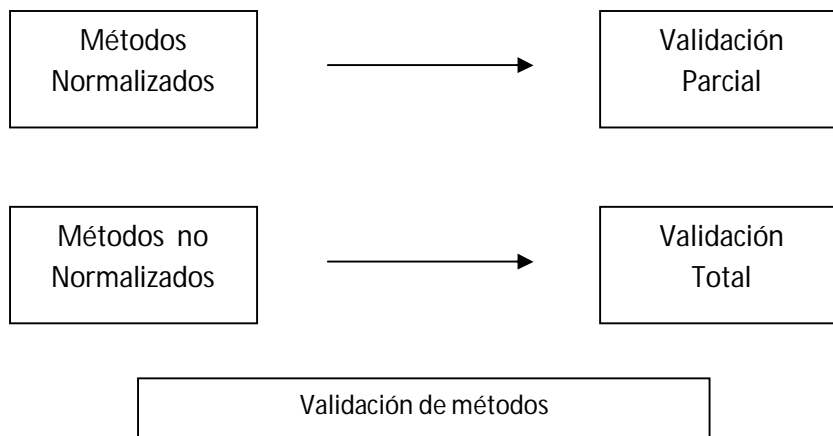
De lo anterior podemos decir que la validación de métodos tiene como objetivo:

- Evaluar las características de desempeño de un método.
- Demostrar que el método desarrollado por un laboratorio es útil para la aplicación propuesta.
- Demostrar que las modificaciones realizadas a un método no afectan su desempeño, obteniendo así resultados confiables.
- Demostrar que un método es equivalente a otro.

V.V ¿Cómo deben validarse los métodos?

El laboratorio que utiliza un método, es responsable de asegurar que el método este validado adecuadamente y si es necesario, de llevar a cabo trabajo adicional para complementar los datos ya existentes. Como ejemplo de lo anterior, cuando un método ha sido validado por una organización de aprobación de normas, por lo general, el usuario necesitará únicamente establecer los datos de desempeño del método para su propio uso.

Otra forma de llevar a cabo la validación del método es mediante un estudio de colaboración entre laboratorios, por ejemplo si un método en proceso de desarrollo tendrá un amplio uso, quizá como un proceso de referencia publicado, entonces el estudio de colaboración involucrando un grupo de laboratorios es probablemente la forma más conveniente de llevar a cabo la validación.



V.V Parámetros de aplicación en la validación de métodos

A continuación se enuncian y se definen los parámetros de aplicación que deben ser considerados para la validación del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, cabe señalar que el laboratorio debe decidir cuáles son los parámetros de desempeño que deben ser aplicados al método en estudio.

- **Límite de detección:** Es importante saber cuál es la cantidad más pequeña que el mesurando puede detectar de manera confiable al emplear el método de prueba.

El límite de detección, es expresado como la concentración C_L , o la cantidad q_L , que se deriva de la medida más pequeña x_L , que puede detectarse con certeza razonable por un procedimiento analítico dado.

Para fines del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, el límite de detección es igual a 1[ml]. Esta cantidad fue determinada debido a que 1[ml] es la cantidad más pequeña de volumen de filtrado que puede ser medido de manera confiable por el método de prueba. Esto sin importar que la cantidad de filtrado obtenido haya sido mínima.

- **Límite de cuantificación:** El límite de cuantificación es estrictamente la concentración más baja del analito que puede ser determinada con un nivel aceptable de precisión de repetibilidad y veracidad. Para el caso del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, no existe un límite de cuantificación debido a el analito en estudio fue el filtrado total acumulado durante la prueba. Sin importar que este estuviese conformado por agua, aditivos y materiales arcillosos que formularon al fluido en estudio. No se analizaron concentraciones. Por lo tanto no aplica.

- **Exactitud:** La exactitud está referida a la proximidad de concordancia entre el resultado de una medición y el valor de referencia aceptado. Para fines del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, los blancos o valores de referencia aceptados fueron obtenidos en base a los *stock's* formulados.

A continuación, se muestran las gráficas con los resultados de filtrado obtenidos para los dos fluidos empleados en el método de prueba. Se marca el valor de referencia aceptado y los límites tanto superior como inferior que determinan una incertidumbre en la medición de $\mp 0.16 [ml]$ para el fluido A y de $\mp 0.64 [ml]$ para el fluido B lo cual indica un nivel de confianza en la lectura de 95%.

Fig. 5.1. Gráfica de la exactitud entre los resultados de filtrado en base al valor de referencia para el fluido A.

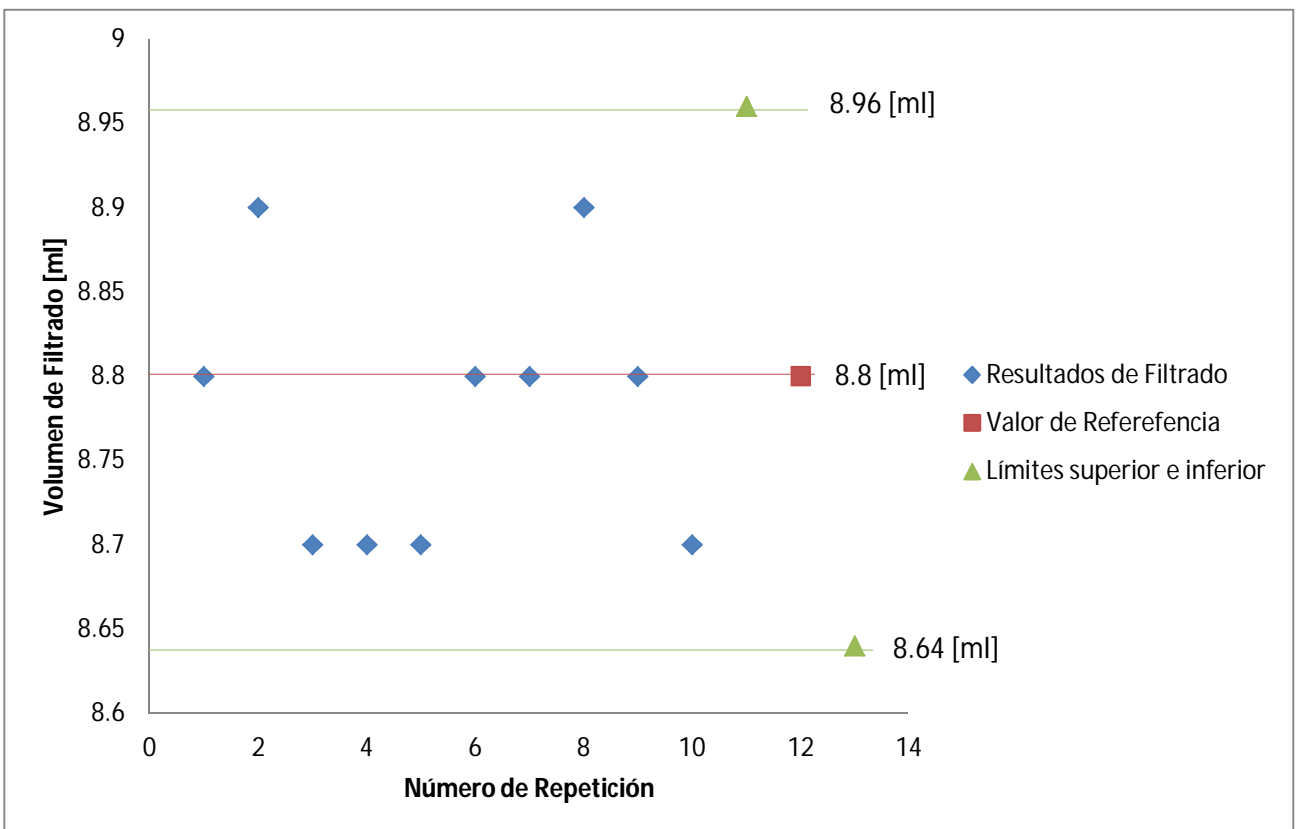
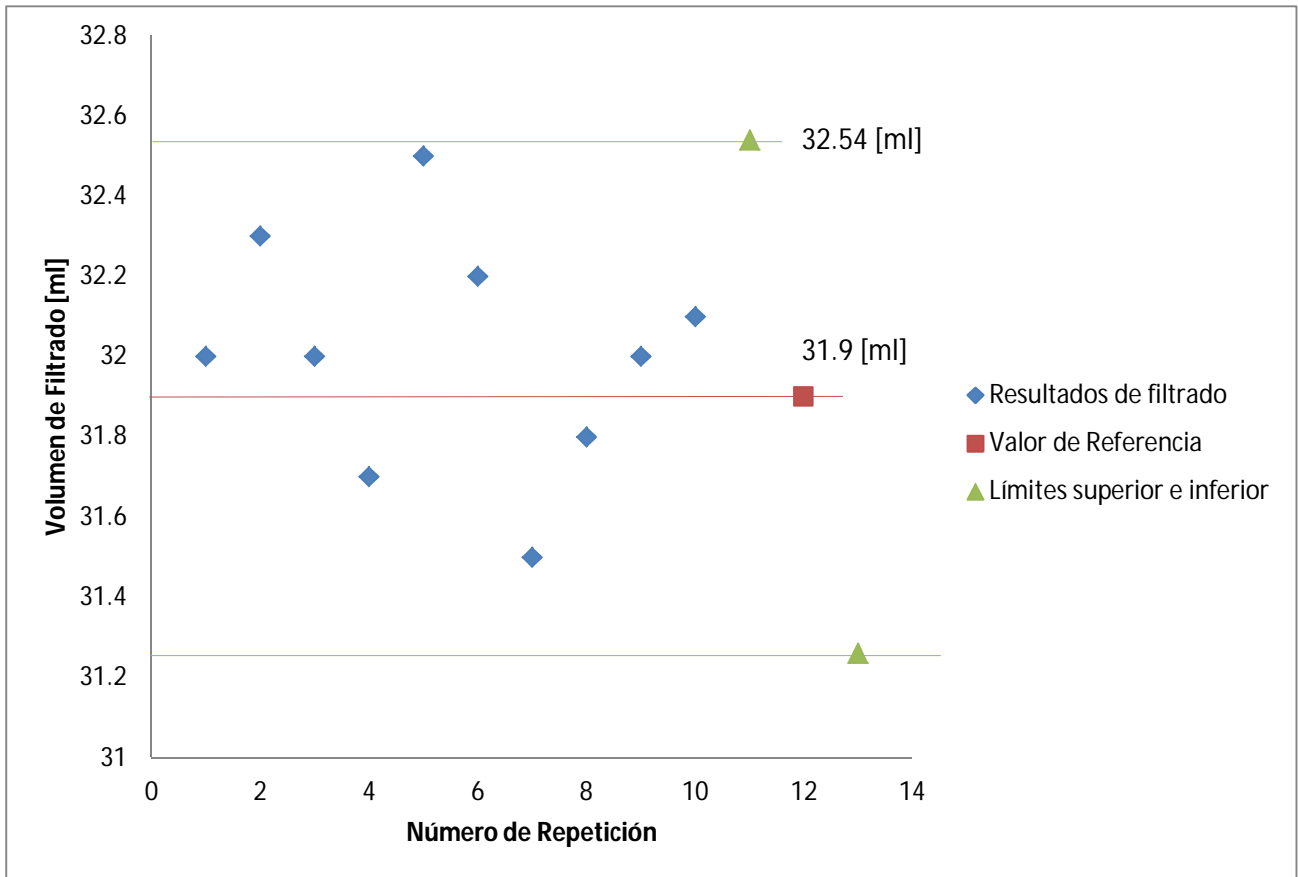


Fig. 5.2. Gráfica de la exactitud entre los resultados de filtrado en base al valor de referencia para el fluido B.



Por lo tanto podemos concluir que el método de prueba es exacto, debido a que los resultados de filtrado obtenidos se localizaron muy cercanos al valor de referencia como se puede observar en las gráficas 5.1 y 5.2.

- **Precisión:** Es la proximidad de concordancia entre los resultados de pruebas independientes obtenidos bajo condiciones estipuladas.

La precisión depende sólo de la distribución de los errores aleatorios y no se relaciona con el valor verdadero o al valor de referencia. La medida de la precisión, se calcula como una desviación estándar de los resultados de la prueba. Esto

significa que los resultados fueron obtenidos de tal forma que no fueran influenciados por cualquier otro resultado previo sobre el mismo o similar objeto de prueba.

Para el caso del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, se calculó la desviación estándar en el capítulo anterior. Esta dispersión de resultados también puede observarse en las gráficas 5.1 y 5.2. Y en base a los resultados obtenidos, podemos concluir que el método de prueba es preciso.

- **Reproducibilidad:** La reproducibilidad es la condición bajo la cual los resultados obtenidos en la prueba se obtienen con el mismo método, con los mismos instrumentos, bajo las mismas condiciones de operación, pero con un diferente analista.

Para fines del método de prueba, la reproducibilidad del método se ve reflejada en el parámetro de aplicación referente a la exactitud. Esto es porque se consideró un valor de referencia, obtenido en base a un *stock* y los resultados se compararon en base a este resultado. Por lo tanto el método presenta reproducibilidad.

- **Repetitividad:** La repetibilidad se presenta cuando los resultados de una prueba son independientes y se obtienen mediante el mismo método, con los mismos instrumentos, bajo las mismas condiciones de operación y las son llevadas a cabo por el mismo analista. La repetibilidad del método de prueba fue analizada en el capítulo anterior y resultados fueron plasmados en las tablas 4.5 y graficados en la figura 5.1 y 5.2.

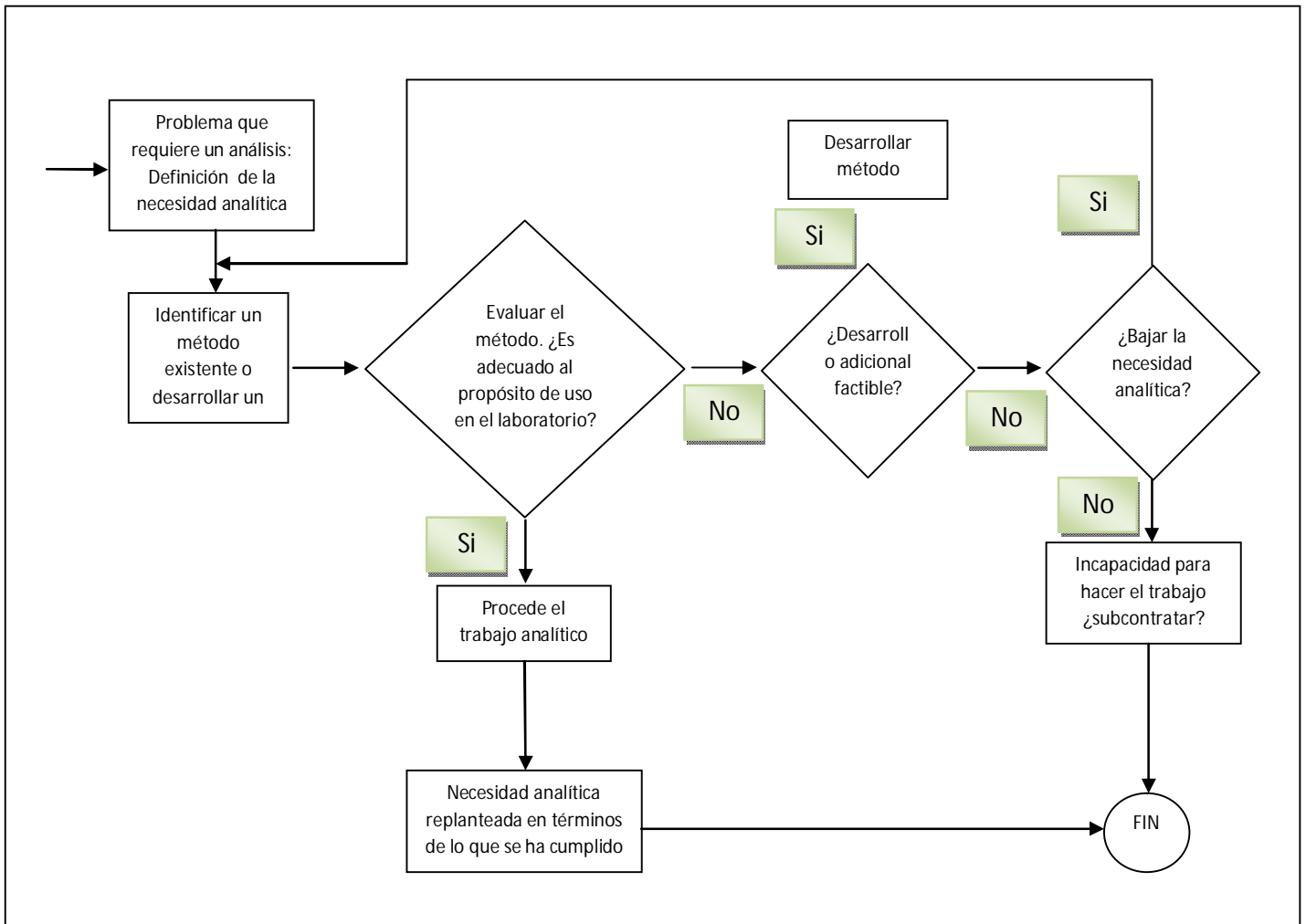
Por lo tanto podemos decir que el método de prueba es repetitivo con un nivel de confianza de 95% como fue mostrado en el capítulo anterior.

- **Robustez:** La robustez de un procedimiento analítico es una medida de su capacidad de permanecer inalterado por variaciones pequeñas pero deliberadas en los parámetros del método y proporciona una indicación de su confiabilidad durante su uso normal. Esta prueba de robustez evalúa el comportamiento de un proceso analítico cuando se efectúan pequeños cambios en las condiciones ambientales y/o de operación, semejantes a aquellos que pudieran surgir en los diferentes ambientes de prueba, de esta forma, esta prueba de robustez permite obtener información de los efectos de cambios menores de una forma rápida y sistemática.

En el caso del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, podemos decir que el método es robusto, esto se debe a que el método es un proceso automatizado y por lo tanto las condiciones de operación son controladas por el mismo instrumento y las condiciones ambientales no afectan esto sin importar en donde se lleven a cabo las pruebas.

Se debe alcanzar un nivel de adecuado de confianza en los resultados producidos, de otra forma, el trabajo no tendría ningún valor. Es difícil establecer el balance entre las limitantes de costo, tiempo, y la necesidad de validar el método. En algunas circunstancias será más adecuado destinar el trabajo a otro laboratorio en donde la validación del método pueda realizarse en base a un trabajo de rutina.

Fig. 5.3 Elección, Desarrollo y Evaluación de Métodos.



Nota: La validación del método consiste en la etapa de evaluación, junto con cualquier parámetro de desempeño que puede ser evaluado bajo el desarrollo del método. Aun cuando pudiera contarse con datos de desempeño para el método, la adecuación al propósito será determinada según como se desempeñe el método cuando es utilizado por un analista designado, con el equipo e infraestructura disponibles.

CONCLUSIONES

IMPORTANCIA DE LA EVALUACIÓN DEL FILTRADO DINÁMICO BAJO CONDICIONES DINÁMICAS:

Una correcta evaluación del filtrado dinámico es de gran importancia debido a que las pruebas más comunes para la evaluación del filtrado API y APAT, no consideran que el fluido de control se encuentre en circulación sobre la superficie de la formación permeable.

La circulación del fluido de control afecta la generación del enjarre debido a que la corriente del lodo erosiona la parte superior del enjarre que no se encuentra bien consolidada. Cabe señalar que la erosión que pueda presentar el enjarre es proporcional al esfuerzo cortante aplicado. Este fenómeno se presenta hasta que existe un equilibrio entre la erosión del enjarre y su formación como se vio a detalle en el capítulo dos de la presente tesis. Por esta razón, es de suma importancia considerar el factor de la circulación del lodo además de que se asemeja más a las condiciones reales de operación.

El método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, permite obtener un panorama de la interacción que existe entre el fluido de perforación y la formación permeable a diferentes condiciones de operación, esto es gracias a que el instrumento empleado en el método (Fann modelo 90), permite recurrir a una amplia gama de presiones diferenciales, temperaturas y velocidades de corte que simulan las condiciones de operación que se presentan dentro de los pozos petroleros.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

Los resultados obtenidos por el método pueden ser valiosos, pues pueden influir en toma de decisiones y con ello disminuir riesgos y costos en las operaciones llevadas a cabo en campo.

PERMEABILIDAD DE LA FORMACIÓN:

La permeabilidad de la formación con la que el fluido de control entra en contacto está considerada por el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, por medio de núcleos sintéticos que con una amplia gama de gargantas medias de poro semejan diferentes valores de permeabilidad, estos valores van de los 750 [milidarcies] hasta los 75 [darcies].

A continuación se enlistan las permeabilidades disponibles en los núcleos sintéticos.

Porosidad (tamaño medio de poro)	Permeabilidad
5 micrones	750 milli-darcies
10 micrones	950 milli-darcies
20 micrones	2.8 darcies
35 micrones	5.5 darcies
60 micrones	6.7 darcies
90 micrones	13.5 darcies
150 micrones	26.5 darcies
190 micrones	75 darcies

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

Los núcleos sintéticos presentan la geometría de un anillo cilíndrico con determinado espesor y longitud. Esta geometría permite que la acción de la presión diferencial sobre el núcleo sea como se presenta realmente dentro de un pozo y gracias a esto, el flujo del filtrado a través del medio poroso logra ser lo más cercano a la realidad.

Cabe mencionar que en la prueba de filtrado API anteriormente mencionada, no considera la permeabilidad de la formación. Sin embargo, arroja un comportamiento de filtrado que es representativo y útil para determinar si el fluido de perforación puede ser empleado o no.

Por otro lado en la prueba de filtrado APAT, la permeabilidad de la formación no está representada de igual forma, además de que el sistema no se encuentra automatizado como en el caso del método de prueba y por lo tanto existe mayor riesgo en obtener un error en la lectura obtenida para el valor del filtrado.

CALIDAD DEL ENJARRE:

Las partículas que conforman a un enjarre generado bajo condiciones dinámicas, pasan por un proceso más selectivo para llegar a agruparse y consolidar el enjarre. Esto es debido a que el fluido de control erosiona a las partículas que no se encuentran bien posicionadas en la parte superior del enjarre.

Las partículas que conforman a un enjarre generado bajo condiciones dinámicas, deben de ser adecuadas en el tamaño para integrarse y mantenerse dentro del enjarre. Estas partículas al agruparse crean un sello en la formación permeable y las partículas más pequeñas al irse

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

colocando bajo este mismo mecanismo de selección, hacen que el espacio entre partículas se minimice, provocando que la permeabilidad del enjarre generado bajo estas condiciones sea de menor permeabilidad que la de un enjarre que es generado bajo condiciones estáticas.

Esto se debe a que las partículas que conforman a un enjarre formado bajo condiciones estáticas tienden a encimarse de manera desordenada y como consecuencia, el enjarre tiene una mayor permeabilidad y por lo tanto permite un mayor filtrado.

La calidad del enjarre puede evidenciarse al momento de retirar el núcleo empleado en una prueba de filtrado. Si se observará un enjarre firme y bien consolidado, las condiciones de formación fueron dinámicas, y si se observará que en el enjarre la parte superior se encuentra gelatinosa, sus condiciones de formación fueron estáticas.

SPURT LOSS:

La pérdida instantánea de filtrado (spurt loss), proporciona información de la capacidad que tiene el fluido de control para obturar la formación permeable. Esta característica es quizás una de las variables más importantes a considerar dentro de una prueba de filtrado sin importar si es bajo condiciones estáticas o dinámicas.

Las partículas contenidas y suspendidas en el lodo de perforación al estar sometidas a la acción de una presión diferencial, viajan de la zona de mayor presión a la zona de menor presión introduciéndose dentro de la porosidad efectiva de la formación hasta que las partículas con mayor diámetro comienzan a agruparse dentro de la

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

formación comenzando la generación del enjarre. El fenómeno de la pérdida instantánea (spurt loss) termina hasta que se logra obturar la formación por medio de la generación del enjarre.

El filtrado obtenido posteriormente a la formación del enjarre, será a causa de la permeabilidad del enjarre y esta permeabilidad estará en función del tamaño de partículas contenidas en el fluido de control. Es importante mencionar que entre menor sea la cantidad del filtrado obtenido en el spurt loss, es mejor la capacidad del fluido en obturar la formación. Pero no hay que dejar de recordar que hay que cuidar la viscosidad plástica y el punto de cedencia que son factores importantes y que se tienen que cuidar para tener mayor eficiencia en las operaciones dentro de los pozos y estos factores también dependen de las partículas contenidas en el fluido de control.

CONFIABILIDAD DE LAS PRUEBAS:

Las pruebas realizadas por el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, son llevadas a cabo por medio de un proceso completamente automatizado que esta previamente programado en el equipo de laboratorio Fann modelo 90.

Este procedimiento automatizado solo necesita la intervención del especialista al momento de la programación de la prueba, durante su monitoreo y en caso de ser necesario al momento de la calibración del instrumento. Por lo cual, no existe incertidumbre en la medición que sea generada por el factor del especialista, lo que deja solo las incertidumbres generadas por la reproducibilidad y la repetibilidad del método.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

En el capítulo cuatro y cinco de la tesis, se realizaron los análisis referentes al cálculo de la incertidumbre de la repetibilidad y reproducibilidad del método de prueba, cuyos resultados fueron favorables para la confiabilidad del método.

Por lo tanto podemos concluir que el método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua, es un procedimiento confiable que determina el volumen de filtrado obtenido bajo las condiciones de permeabilidad de la formación, velocidad de corte, temperatura y presión diferencial requeridas para los fines del estudio. Además es importante mencionar que el método es flexible con respecto a cada una de las variables antes mencionadas, logrando con ello tener un mayor alcance en el campo de la determinación del filtrado dinámico, ya que los campos petroleros hoy en día están sometidos a condiciones de presión y temperatura cada vez más elevados y nunca estará de más contar con metodologías que nos permitan estudiar el comportamiento.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

RECOMENDACIONES

Como recomendación en la aplicación del método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

- Antes de ejecutar una prueba de filtrado dinámico, es necesario contar con información concerniente a la permeabilidad de la formación de interés y el fluido de interés. verificar con la gama de núcleos disponible, y emplear el que más se asemeja a la permeabilidad de interés sin olvidar que los resultados de las pruebas de filtrado solo son validadas y por lo tanto confiables para los fluidos base agua.
- Contar con la cantidad de fluido de perforación que es dispensable para realización de la prueba “no menos” y tener a la mano el fluido de purga “agua destilada”.
- Inspeccionar los empaques del equipo, verificar que no estén cuarteados para que no exista una fuga durante la corrida de la prueba.
- Engrasar perfectamente las cuerdas o roscas de las celdas para evitar pegaduras o desgaste de las mismas.
- Calibrar el instrumento para contar con información confiable, además de haberlo limpiado correctamente.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

- Purgar el sistema de aire para que no exista alguna burbuja en el sistema cuando se corra la prueba ya que puede alterar los resultados y dañar al equipo.

- Verificar que las dimensiones del núcleo y que del eje de corte sean las indicadas para la prueba que se vaya a efectuar de lo contrario cambiarlas en la sección de calibración.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Vaussard, *Elf Aquitaine*; M. Martin, *Inst. Francais du petrole*; O. Konirsch, *gas de France* y J. M. Patroni, *TOTAL-CFP*.: “An experimental study of drilling fluids dynamic filtration”. SPE 15412 (1986).
2. Roland F. Krueger, *Union Oil Co. of California*.: “Evaluation of Drilling-Fluid Filter-Loss Additives Under Dynamic Conditions” Journal of Petroleum Technology.
3. C. Bezemer; I. Havenaar, *Koninklijke/Shell exploratie en produktielaboratorium Rijswijk, The Netherlands*.: “Filtration Behavior of Circulating Drilling Fluids”. Society of Petroleum Engineers Journal.
4. B. H. Walker, A. D. Black; Terra Inc.: “Dynamic Spurt-Loss beneath an oilfield bit”. SPE/IADC 25700.
5. B. Gadiyar; R. H. Morales.: “Is spurt-loss a reality during frac/packing in high permeability formations?” SPE 73767 (2002).
6. Dawari David Charles; Xiaopeng Xie. *Department of Petroleum Engineering and Geosciences. Louisiana Tech University*.: “New concepts in dynamic fluid-loss modeling of fracturing fluids”. Journal of Petroleum Science & Engineering.
7. Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez.: “Guía para estimar la incertidumbre de la medición” Centro Nacional de Metrología. Revisión 1 (2004).

Referencias

1. Larsen, D.H., "Determining the Filtration Characteristics of Drilling Muds," Petrol. Eng. (Sep., 1938). pp. 42-48; (Nov., 1938). pp. 50-60.
2. Standard Procedure for Testing Drilling Fluids, API Recommended Practice 13B, 7th edition. April 1978, American Petroleum Institute, Dallas.
3. Von Engelhardt, W. and Schindewolf, E., "The Filtration of Clay Suspensions," Kolloid Z., vol. 127 (1952). pp. 150-164.
4. Outmans, H.D., "Mechanics of Static and Dynamic Filtration in the borehole," Soc. Petrol. Eng. J., vol. 3 (Sep., 1963). pp. 236-244; Trans AIME, VOL. 228.
5. Simpson, J.P., "Drilling Fluid Filtration Under Simulated Downhole Conditions," SPE Paper 4779, Symp. On Formation Damage, New Orleans, Feb. 7-8, 1974.
6. Milligan, D.J., and Weintritt, D.J., "Filtration of Drilling Fluids at Temperatures of 300°F and Above," API Drill. Prod. Prac. (1961). pp. 42-48.
7. Byck, H.T., "Effect of Temperature on Plastering Properties and Viscosity of Rotary Drilling Muds," Petrol Technol. Of AIME, TP 1116 (Nov., 1939).
8. Schremp, F.W., and Johnson, V.L., "Drilling Fluids Filter Loss at High Temperatures and Pressures," J. Petrol. Technol. (June, 1952). pp. 157-162; Trans. AIME, vol. 195.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

9. Bo, M.K., Freshwater, D.C., and Scarlett, B., "The Effect of Particle-Size Distribution on the Permeability of Filter Cakes," Trans, Inst. Chem. Eng. (London), vol. 43 (1965). pp. T228-T232.
10. Williams, M., and Cannon, G.E., "Filtration Properties of Drilling Muds," API Drill. Prod. Prac. (1938). pp. 20-28.
11. Byck, H.T., "The Effect of Formation Permeability on the Plastering Behavior of Mud Fluids," API Drill. Prod. Prac. (1940). pp. 40-44.
12. Gates, G.L., and Bowie, C.P., "Correlation of Certain Properties of Oil-Well Drilling Fluids with Particle Size Distribution," U.S., Bureau of Mines Report of Investigations, No. 3645 (May, 1942).
13. Krumbien, W.C., and Monk, G.D., "Permeability as a Function of the Size Parameters of Unconsolidated Sand," Trans AIME, vol. 151 (1943). pp. 153-163.
14. Scanley, C.S., "Mechanism of Polymer Action in Control of Fluid Loss from Oil Well Drilling Fluids," Amer. Chem. Soc. Meeting, Washington, D.C. (March, 1962).
15. Darley, H.C.H., "Design of Fast Drilling Fluids," J. Petrol. Technol. (April, 1965). pp. 465-470; Trans AIME. Vol. 284.
16. Glenn, E.E., and Slusser, M.L., "Factors Affecting Well Productivity II Drilling Fluid Particle Invasion into Porous Media," J. Petrol. Technol. (May, 1957). pp. 132-139; Trans AIME, vol.210.
17. Young, F.S. Jr. and Gray, K.E., "Dynamic Filtration During Microbit Drilling," J. Petrol. Technol. (Sept., 1967). pp. 1209-1224; Trans AIME, vol. 240.
18. Darley, H.C.H., "Prevention of Productivity Impairment by Mud Solids," Petrol. Eng. (Sept., 1975). pp. 102-110.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

19. Abrams. A., "Mud Design to Minimize Rock Impairment Due to Particle Invasion," J. Petrol. Technol. (May, 1977). pp. 586-592.
20. Krueger, R.V. and Vogel, L.C., "Damage to Sandstone Cores by Particles from Drilling Fluid," API. Drill. Prod. Prac. (1954). pp. 158-168.
21. Beeson, C.M., and Wright, C.W., "Loss of Mud Solids to Formation Pores," Petrol. Eng. (Aug., 1952). pp. B40-B52.
22. Coberly, C.J., "Selection of Screen Openings for Unconsolidated Sands," API Drill. Prod. Prac. (1937). pp. 189-201.
23. Prokop, C.L., "Radial Filtration of Drilling Mud," J. Petrol. Technol. (Jan., 1952). pp. 5-10; Trans. AIME, vol. 195.
24. Ferguson, C.K., and Klotz, J.A ., "Filtration from Mud During Drilling," J. Petrol. Technol. (Feb., 1954). pp. 29-42; Trans. AIME, vol. 201.
25. Horner, V., White, M.M., Cochran, C.D., and Deily, F.H., "Microbit Dynamic Filtration Studies," J. Petrol. Technol. (June, 1957). pp. 183-189; Trans. AIME vol. 210.
26. Cunningham, R.A. and Eenik, J.E., "Laboratory Study of Effect of Overburden, Formation, and Mud Column Pressures on Drilling Rate of Permeable Formations," J. Petrol. Technol. (Jan, 1959). pp. 9-17; Trans, AIME. Vol. 216.
27. Havenaar, I., "Mud Filtration at the Bottom of the Borehole," J. Petrol. Technol. (May, 1956). pp. 64; Trans AIME, vol. 207. pp.312.
28. Lawhon, C.P., Evans, W.M., and Simpson, J.P., "Laboratory Drilling Rate and Filtration Studies of Clay Polymer Drilling Fluids," J. Petrol Technol. (May, 1967). pp. 688-694; also "Laboratory Drilling Rate Studies of Emulsion Drilling Fluids," J. Petrol Technol. (July, 1967). pp. 943-948; Trans. AIME, vol. 240.

Método de prueba para la determinación de la pérdida de filtrado dinámico a alta presión y a alta temperatura para fluidos de perforación base agua

29. Krueger, R.F., "Evaluation of Drilling-Fluid Filter-Loss Additives under Dynamic Conditions," J. Petrol Technol. (Jan, 1963). pp. 90-98; Trans. AIME vol. 228.
30. Cook, E.L., "Filter Cake Thickness Gage," U.S. Patent No. 2,691,298 (Oct. 12, 1954).