



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

**“REHABILITACION DEL PERMEAMETRO DE GAS”**

**PROYECTO DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN PETRÓLEO**

Presentado por:

**ALLAN JAVIER CALLE CONDOR**

**GUAYAQUIL-ECUADOR**

**2017**

## DEDICATORIA

Este logro debo dedicarlo a todos aquellos que han estado presente en mi vida; sin embargo, dedico esta meta a mi familia, quienes han sido mi soporte y me han dado el impulso necesario para culminar este proyecto; dedico también esta meta a mis profesores, quienes han compartido sus conocimientos, los cuales los pondré en práctica durante mi vida profesional

Allan Javier Calle Cóndor

## **AGRADECIMIENTO**

Escribo estas líneas para agradecer a aquellas personas que me han apoyado hasta ahora; sin ellos no habría podido culminar esta época universitaria; agradezco a mis padres Ing. Rafael Hermogenes Calle Ruiz quien con su esfuerzo me brindó educación y cariño; así mismo, agradezco a mi mamá, Flor Narcisa Córdor Amaguay, quien me apoyo en todo momento y me guía en todas mis decisiones; así mismo agradezco al Ing. Bryan Medina, con quien iniciamos este proyecto, culminándolo de manera satisfactoria.

Allan Javier Calle Córdor

# **TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

---

**PhD. David Matamoros Camposano  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**MSc. Romel Erazo  
DIRECTOR DE MATERIA INTEGRADORA**

---

**MSc. Fidel Chuchuca  
MIEMBRO EVALUADOR**

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, nos corresponde exclusivamente; y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la  
ESPOL)

---

**Allan Javier Calle Córdor**

## RESUMEN

En este proyecto de grado se presenta la rehabilitación del Permeámetro de gas para el método de medición de permeabilidad a núcleos consolidados de formación. El equipo se encuentra en el Laboratorio de Petróleo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, este abarca conceptos básicos, la parte experimental y el procedimiento de cálculo

En la parte experimental se hace una breve descripción del estado del equipo después de haber permanecido sin usar por varios años en el laboratorio de petróleo de igual forma describiremos la rehabilitación y calibración de cada una de las piezas del equipo y que función cumplen cada uno de ellas durante las pruebas de laboratorio. Para el procedimiento utilizamos los núcleos que se encuentran en los laboratorios de petróleo, pero primero debemos hacer una limpieza de núcleo con tolueno y luego si calculamos las permeabilidades respectivas Para demostrar que el equipo esta rehabilitado se explica el procedimiento de validación usando varios métodos y cumpliendo con todas las normas en la cual se basa el servicio de acreditación ecuatoriano

Finalmente comprobando que nuestro equipo está en buen estado y funciona correctamente procedemos a hacer nuestras conclusiones y recomendaciones de nuestro proyecto de graduación

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO .....	II
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN .....	III
DECLARACIÓN EXPRESA .....	IV
RESUMEN .....	V
ABREVIATURA.....	X
SIMBOLOGIA .....	XI
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
INDICE DE TABLAS .....	XIV
<b>CAPITULO 1.....</b>	<b>15</b>
<b>GENERALIDADES DEL PROYECTO.....</b>	<b>15</b>
1.1 Introducción .....	16
1.2 Planteamiento del problema .....	16
1.3 Objetivos Generales y Específicos .....	17
1.3.1 Objetivo General .....	17
1.3.2 Objetivos Específicos .....	17
1.4 Justificación del problema .....	18
1.5 Metodología.....	19
1.5.1 Identificación del problema.....	19

1.5.2 Análisis del equipo.....	19
1.5.3 Ensamblaje del equipo .....	20
1.5.4 Pruebas de laboratorio .....	20
<b>CAPITULO 2.....</b>	<b>21</b>
<b>MARCO TEORICO .....</b>	<b>21</b>
2.1 Conceptos básicos .....	22
2.1.1 Validación de métodos .....	22
2.1.2 Calibración en calidad .....	22
2.1.3 Corrosión.....	23
2.2 Porosidad .....	24
2.2.1 Definición.....	24
2.2.2 Clasificación la porosidad de acuerdo a la conectividad de los poros. ....	24
2.2.3 Clasificación de la porosidad de acuerdo a su origen. ....	25
2.2.4 Factores que afectan a la porosidad .....	25
2.3 Tipos de permeabilidad .....	26
2.3.1 Permeabilidad relativa .....	26
2.3.2 Permeabilidad específica.....	27
2.3.3 Permeabilidad absoluta.....	28
2.4 Ley de Darcy y coeficiente de permeabilidad .....	28
2.4.1 Ley de Darcy .....	28
2.4.2 Coeficiente de permeabilidad .....	29



2.5 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo .....	31
2.5.1 Permeámetro de carga constante .....	31
2.5.2 Permeámetro de carga variable .....	33
2.6 Tipos de viscosidades .....	36
2.6.1 Viscosidad dinámica o absoluta.....	36
2.6.2 Viscosidad aparente .....	36
2.6.3 Viscosidad Cinemática .....	37
<b>CAPITULO 3.....</b>	<b>38</b>
<b>PARTES Y ESPECIFICACIONES.....</b>	<b>38</b>
3.1 Caja principal.....	39
3.2 Accesorios .....	40
3.3. Válvula de bola para servicios ON-OFF .....	40
3.3.1 Diseño .....	40
3.3.2 Aplicaciones .....	41
3.3.3. Características especiales.....	42
3.4 Regulador de presión de gas.....	43
3.5 Celda porta núcleos.....	44
3.5.1 Sistema CoreDrill.....	45
3.5.2 Sistema de Obtención de Datos in Situ .....	45
3.6 Bombona de gas.....	47
3.7 Manómetro .....	48
<b>CAPITULO 4.....</b>	<b>50</b>

<b>PROCEDIMIENTO Y PRUEBA DE LABORATORIO .....</b>	<b>50</b>
4.1 Limpieza de núcleo con tolueno .....	51
4.2 Procedimiento para determinar la permeabilidad absoluta de muestras de roca.....	52
<b>CAPITULO 5.....</b>	<b>55</b>
<b>VALIDACION DEL EQUIPO.....</b>	<b>55</b>
5.1 Robustez del método.....	57
5.2 Repetibilidad.....	57
5.3 Reproducibilidad.....	58
5.4 Determinación de Repetibilidad y Reproducibilidad.....	59
5.5 Determinación de la exactitud del resultado .....	65
5.6 Determinación del límite de cuantificación.....	66
<b>CAPITULO 6.....</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACION .....</b>	<b>67</b>
6.1 Conclusiones .....	68
6.2 Recomendaciones .....	69

## **BIBLIOGRAFIA**

## ABREVIATURA

cm	Centímetros
cm <sup>2</sup>	Centímetros cuadrados
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
ml	Mililitros
L	Litros
s	Segundos
Min	Minutos
hr	Horas
mD	Milidarcies
lb	Libras
In	Pulgadas cuadradas
°F	Grados Fahrenheit
°C	Grados centígrados
gr	Gramos
Psi	Libras por pulgadas cuadradas

## SIMBOLOGIA

H	Altura
D	Diámetro
m	Masa
M1	Masa del núcleo seco
M2	Masa del núcleo saturado
Moil	Masa del petróleo
$\rho$	Densidad
$\rho_w$	Densidad del agua
$\rho_o$	Densidad del petróleo
Vp	Volumen poroso
V	Volumen
Vo	Volumen del petróleo
Vw	Volumen del agua
Vow	Volumen del agua y oíl

$\Phi$	Porosidad
$S_w$	Saturación del agua
$S_o$	Saturación del petróleo
$S_g$	Saturación del gas
$\gamma$	Gravedad específica
API	Grados API
$M_t$	Masa total
T	Temperatura
L	Longitud
P	Presión atmosférica
A	Área transversal
$\mu$	Viscosidad del nitrógeno
k	Permeabilidad
$L_p$	Lectura del permeámetro
q	Caudal

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Esquema del permeametro de carga constante .....	33
<b>Figura 2</b> Esquema del permeametro de carga variable .....	34
<b>Figura 3</b> Curva de fluidez para presentar la viscosidad dinámica y aparente .....	37
<b>Figura 4</b> Partes del permeametro de gas .....	39
<b>Figura 5</b> Accesorios del permeametro de gas .....	40
<b>Figura 6</b> Válvula de bola para servicio ON-OFF.....	42
<b>Figura 7</b> Regulador de presión NORGREN R07-200-RNKA.....	44
<b>Figura 8</b> Celda porta núcleo .....	45
<b>Figura 9</b> Brocas para extraer núcleos .....	46
<b>Figura 10</b> Bombona de gas.....	48
<b>Figura 11</b> Manometro .....	49
<b>Figura 12</b> Limpieza de nucleo con tolueno.....	52
<b>Figura 13</b> Viscosidad del aire y nitrógeno en función de la temperatura .....	54
<b>Figura 14</b> Carta de calibración de los rotatometros Q vs Cm.....	54
<b>Figura 15</b> Extrapolación de números de ensayos no tabulados para cálculos de k1 .....	61
<b>Grafico 16</b> Extrapolación de números de ensayos no tabulados para cálculos de k2 .....	63

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Datos para calcular permeabilidad.....	58
<b>Tabla II.</b> Datos de permeabilidades obtenidos por el tesista y analista .....	59
<b>Tabla III.</b> Números de ensayos.....	62
<b>Tabla IV.</b> Tabla de resultados de reproducibilidad.....	64
<b>Tabla V.</b> Tabla de resultados de permeabilidad.....	65

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES DEL PROYECTO**



## **1.1 Introducción**

El presente trabajo tiene como objetivo principal la rehabilitación del permeámetro de gas que se encuentran en los laboratorios de petróleos situados en la facultad de ingeniería en ciencia de la tierra. Este equipo es muy importante para la formación de los estudiantes y futuros profesionales.

La función de los laboratorios en las distintas universidades del mundo, es perfeccionar la parte teórica con la realidad por medio de modelos a escalas o iguales a los utilizados en la realidad para que cuando el estudiante o profesional tenga algún problema por resolver en el campo laboral de su profesión posea la capacidad para aportar con soluciones razonables a lo que está sucediendo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

El permeámetro de gas es uno de los equipos muy importantes en el laboratorio de petróleo y es un pilar fundamental en la formación de los estudiantes sin embargo el equipo no está funcionando motivo por el cual este equipo en el laboratorio no está a disposición de los estudiantes de la universidad generando vacíos en el conocimiento de dichos estudiantes por cuanto poner en práctica la teoría impartida por los maestros es de vital importancia en nuestra Facultad.

## **1.3 Objetivos Generales y Específicos**

### **1.3.1 Objetivo General**

-Rehabilitar el permeámetro de gas para que los futuros estudiantes de ingeniería en petróleo desarrollen sus prácticas de manera eficiente y conseguir resultados confiables al momento de realizar las pruebas en el laboratorio de petróleos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

-Inspeccionar el equipo y sus diferentes partes para reconocer su estado

-Rehabilitar y calibrar las diferentes partes del equipo mediante la aplicación de estándares recomendados

-Limpieza de núcleo con tolueno previo a los cálculos de la permeabilidad absoluta

-Determinar la permeabilidad absoluta de muestras de roca

-Validar la rehabilitación y calibración del equipo mediante métodos cuantitativos de validación

#### **1.4 Justificación del problema**

La realización de este proyecto es de suma importancia para el laboratorio de petróleo y estudiantes de la carrera ingeniera en petróleo, su finalidad es rehabilitar el equipo permeámetro de gas por medio de varios procedimientos y pruebas de laboratorio y cálculos correspondientes por el cual tomara 20 días laborables aproximadamente.

El equipo estará a disposición en las prácticas realizadas por los estudiantes de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, generando así las mismas condiciones para todos los estudiantes, respecto a los conocimientos recibidos por los diferentes maestros; procurando que el equipo rehabilitado esté en óptimas condiciones para su utilización.

Por esto yo me decidí a trabajar en la rehabilitación del permeámetro de gas dejando un aporte a nuestra facultad que nos ayudó en la formación profesional

## **1.5 Metodología**

### **1.5.1 Identificación del problema**

Para la rehabilitación se determinó que el equipo tenía los siguientes desperfectos

- La válvula de tres vías estaba completamente dañada
- Las cañerías de cobre estaban incompletas y oxidadas
- El regulador de presión no estaba funcionando normalmente

### **1.5.2 Análisis del equipo**

Para la rehabilitación del permeámetro de gas tenemos que ver que todas las piezas estén completas y en buen estado después tenemos que ver mediante ensayos de laboratorio a ver si hay fugas en las cañerías y mangueras de alta presión debemos ajustar bien todas las mangueras con teflón y cuando estén bien ajustadas realizaremos las pruebas de laboratorios y veremos cómo varían nuestros resultados.

### **1.5.3 Ensamblaje del equipo**

Con todas las piezas a disposición y las herramientas adecuadas se procedió a ensamblaje. Pero en nuestro proyecto debemos modificar el equipo por el motivo de que algunas partes del equipo están dañadas.

### **1.5.4 Pruebas de laboratorio**

Teniendo ya el equipo armado él se procederá a realizar las respectivas pruebas de laboratorio con el fin de comprobar si opera normalmente pero esta ocasión como el equipo se modificó, tendríamos que ver primero si funciona el equipo y hacer varias pruebas para que nuestros resultados no salgan con tantos errores.

# **CAPITULO 2**

## **MARCO TEORICO**

## **2.1 Conceptos básicos**

### **2.1.1 Validación de métodos**

La validación de un método es la técnica para comprobar que el procedimiento analítico utilizado para una prueba en concreto es apropiado para su uso previsto. Los resultados de la validación del método pueden ser aptos para juzgar la calidad, la fiabilidad y la firmeza de los resultados analíticos, se trata de una parte integrante de cualquier buena práctica analítica. (Ludwig, H. 1998).

### **2.1.2 Calibración en calidad**

#### **Introducción**

Las exigencias de una calidad establecida en la industria actual, hacen necesaria la aparición de sistemas de aseguramiento/gestión de la calidad encaminados a estimar y garantizar que los productos y servicios responden a las expectativas de calidad de los clientes.

En el campo de la medida, no todo se fundamenta en disponer de los mejores instrumentos, sino que tenemos que establecer una relación perfecta entre su “bondad” y su coste. Mucha relación con esto tiene la denominada: ISO 17025. (Gestion-Calidad.com, A. 2016)

### **Definiciones importantes**

-Incertidumbre: Intervalo de medidas entorno al valor de una indicación del equipo, dentro del cual podemos asegurar, con un nivel de probabilidad determinado que se encuentra el valor verdadero de la magnitud medida.

-Calibración: Es el conjunto de operaciones que establecen, con condiciones especificadas, la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento de medida y los valores de la magnitud física medida a través de patrones.

-Patrón: Es un instrumento de medida o sistema de medida destinado a definir, o reproducir uno o varios valores de una magnitud para que sirvan de referencia. El patrón está relacionado con el valor verdadero de la magnitud física medida. Para calibrar un equipo de laboratorio siempre deberemos de disponer de un patrón de calibración mejor que el equipo a calibrar.

-Trazabilidad: Propiedad del resultado de una medición, por la cual esta puede ser relacionada a los patrones nacionales o internacionales adecuados, por medio de una serie ininterrumpida y documentada de intercomparaciones.

### **2.1.3 Corrosión**

La corrosión es una reacción química producto de la fusión del metal con el oxígeno, de modo que , la corrosión es un deterioro analizado en un objeto metálico a causa de un alto impacto electroquímico de



carácter oxidativo y la velocidad degenerativa de dicho material depende de la exposición al agente oxidante, la temperatura presentada, si se encuentra expuesto a soluciones salinizadas (conjugadas con sal), y por ultimo de las propiedades químicas que tengan estos agentes metálicos; el procedimiento de la corrosión es totalmente espontaneo y natural, también pueden presentar este proceso materiales que no sean metálicos.(Definista ,C. 2015).

## **2.2 Porosidad**

### **2.2.1 Definición**

La porosidad es una propiedad de la roca y está descrita como el porcentaje del volumen poroso de la roca al volumen total de la misma. La porosidad esta expresada en porcentaje y de acuerdo a que tanto por ciento tengamos de porosidad podremos conocer cuánto fluido puede acumular dicha roca. (Porosidad de Yacimientos de petróleo. Torres, V. 2008)

### **2.2.2 Clasificación la porosidad de acuerdo a la conectividad de los poros.**

-Total: Es la porción del volumen total que corresponde al volumen de poros conectados o no, entre sí.

-Efectiva: Es la porción del volumen total que corresponde al volumen de poros conectados entre sí. La porosidad efectiva se mide en la mayoría de los porosímetros y es la más importante para la estimación de petróleo y gas en sitio.

-No efectiva: Es la porción del volumen total que corresponde al volumen de poros no conectados entre sí.

### **2.2.3 Clasificación de la porosidad de acuerdo a su origen.**

-Primaria: Es la que tiene la roca de la fase depositacional – inicio del enterramiento, los granos no han sido cambiados, quebrantados o disueltos.

-Secundaria: Espacio poroso agregado originado por procedimientos post-sedimentación y diagénesis.

### **2.2.4 Factores que afectan a la porosidad**

-Uniformidad del tamaño de los Granos: Está definido por el arreglo de los granos durante la sedimentación. Si escoges bien la uniformidad del tamaño de los granos se tiene mayor porosidad y cuando más grande sea el diámetro de los granos mayor diámetro de poros.

-Forma de lo Granos: Pueden ver granos redondeados y no redondeados. La porosidad es mejor cuando los granos son redondeados. Los cambios en los granos se deben a procedimientos de compactación y diagénesis.

-Régimen de Deposición: Esferas con diferente empaquetamiento presentan distintas porosidades. Tenemos empaquetamientos cúbicos, ortorrómbicos, tetragonal esfenoidal y rombohedral.

-Compactación Mecánica: Es la disminución del volumen total de los sedimentos ocasionados por esfuerzos de compresión causados por sedimentos suprayacentes.

-Compactación Química: Es la disminución del volumen debido a reacciones cuando se produce la diagénesis.

-Cementación: La dimensión, su forma y continuidad de los canales también se afecta debido a la deposición de cuarzo, calcita y dolomita o unión entre éstas.

## **2.3 Tipos de permeabilidad**

### **2.3.1 Permeabilidad relativa**

Es un término adimensional implementado para acomodarse a la ecuación de Darcy y a las condiciones de flujo multifásico.

La permeabilidad relativa es la relación entre la permeabilidad efectiva de un fluido, con una saturación ya establecida, y la permeabilidad absoluta de este fluido en condiciones de saturación total.

Si en una roca solo existiera un solo fluido presente, su permeabilidad relativa es de 1,0. El cálculo de la permeabilidad relativa permite ver la comparación de las diferentes capacidades de los fluidos para fluir en su respectiva presencia, ya que la presencia de más de un fluido por lo general inhibe el flujo. (Hurst et al., 2001)

### **2.3.2 Permeabilidad específica**

Es la permeabilidad de un medio poroso cuando hay un solo fluido presente con respecto a un fluido específico. La permeabilidad está definida como una propiedad del medio poroso. De modo que, la permeabilidad medida en las muestras dependería del fluido utilizado. Por ejemplo, los líquidos pueden cambiar la permeabilidad a través del movimiento de los finos y de la alteración de la arcilla; la permeabilidad al gas depende del deslizamiento y de la resistencia inercial, Entonces, es más correcto hablar de permeabilidad específica a un fluido determinado, si bien, en la práctica, es común el uso del término más corto, es decir, permeabilidad

### 2.3.3 Permeabilidad absoluta

Es la medida de la permeabilidad, o de la capacidad de flujo a través de una roca, obtenida cuando solo existe un fluido presente en la roca. El símbolo más utilizado para la permeabilidad es  $k$ , y se mide en unidades de darcies o milidarcies.

## 2.4 Ley de Darcy y coeficiente de permeabilidad

### 2.4.1 Ley de Darcy

El flujo de agua a través de los medios porosos está denominado por una ley descubierta experimentalmente por Darcy en 1856, quien estuvo investigando las características del flujo de agua a través de filtros de material terreo. Utilizando algunos dispositivos de diseño, Darcy encontró que para velocidades demasiadas pequeñas el caudal  $Q$  es:

$$Q = \frac{\delta V}{\delta t} = kiA \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Dónde:  $Q$ : Caudal o gasto ( $\text{cm}^3/\text{seg}$ )

$\delta V$ : Variación del volumen en un diferencial de tiempo

$\delta t$ : Diferencial de tiempo

K: Coeficiente de permeabilidad (cm/seg)

i: gradiente hidráulico (adimensional)

A: Sección transversal del filtro (cm<sup>2</sup>)

Si se considera la ecuación de continuidad

$$Q=v \cdot A \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Dónde:

Q: Caudal o gasto (cm<sup>3</sup>/seg)

v: Velocidad (cm/seg)

A: Área transversal (cm<sup>2</sup>)

Es posible relacionarlo de la forma tal que

$$V=k \cdot i \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Expresión conocida como ley de Darcy.

#### **2.4.2 Coeficiente de permeabilidad**

Los estudios de Darcy utilizan un valor de velocidad v, dicha velocidad es la velocidad de descarga que está definida como la acumulación de agua que circula en la unidad de tiempo a través de una superficie

unitaria perpendicular a las líneas de filtración. En arenas firmes saturadas y en otros suelos de granos finos, donde el movimiento del agua no afecta la configuración del material, la velocidad  $v$  puede ser determinada casi exactamente por:

$$V = i_p \frac{k}{\eta} \text{ (cm/seg)} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Dónde:

$\eta$  = Viscosidad del agua, en KNseg/cm<sup>2</sup>

$K$  = Constante de permeabilidad (empírica), en cm<sup>2</sup>

$i_p$  = Gradiente de presiones, en KN/cm<sup>3</sup>

La viscosidad del agua se reduce con la temperatura,  $k$  es constante para un material permeable ya conocido, la porosidad ya está establecida y además no depende de las propiedades físicas del líquido que filtra por el material. Si se reemplaza el valor de  $i_p$  por su equivalente  $i \cdot y_w$ . Se tiene

$$V = i \cdot y_w \cdot \frac{k}{\eta} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

La mayoría de las preguntas o preocupaciones que tienen los ingenieros civiles, trata de las filtraciones de agua a bajas

profundidades, con muy poca variación de la temperatura del líquido, de modo que  $\gamma_w$  es prácticamente constante. Por lo tanto, dentro de ese rango de temperaturas  $\eta$  varía entre límites poco extensos, la ecuación anterior se puede expresar como:

$$V=k \cdot i$$

Donde

$$K=\gamma_w \frac{k}{\eta} \text{ (cm/seg)} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

K es el coeficiente de permeabilidad, que se define como una función de la constante de permeabilidad del material, la viscosidad y el peso específico del fluido circulante. Entonces, el valor de k, expresado en cm/seg, puede ser estimado como la velocidad del agua a través de un suelo cuando está sujeta a un gradiente hidráulico unitario. (Angelón, S., Garibay, M. and Cauchape, M. 2006)

## **2.5 Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo**

### **2.5.1 Permeámetro de carga constante**

Es el método más fácil para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo. Conociendo el área transversal A y longitud L del suelo, confinadas en un tubo, este se somete a una carga hidráulica h. El agua



circula a través de la muestra, la cantidad se mide (en cm<sup>3</sup>) que pasa en un tiempo t. El gradiente hidráulico permanece constante a lo largo de todo el periodo del ensayo. Los niveles de agua superior e inferior se mantienen constante por desborde, con lo cual h permanece constante, pues solo depende de la diferencia que hay entre los niveles. La cantidad de agua que fluye se acumula en una bureta graduada. Conocidos los valores Q, h, L, A, se procede al cálculo del coeficiente de permeabilidad. Aplicando la Ley de Darcy

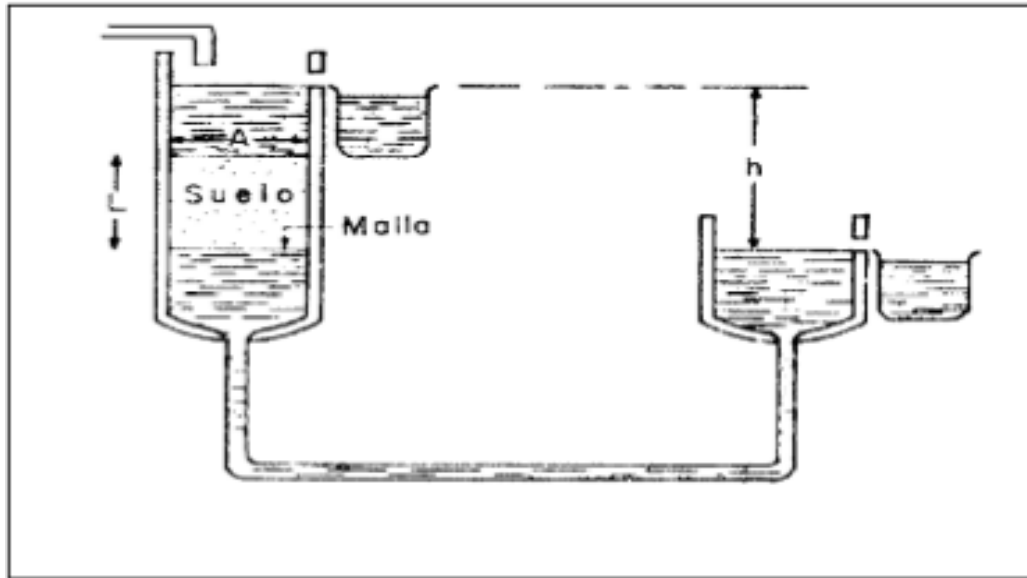
$v'(\text{Cm/seg}) = K \cdot i$  y la ecuación de continuidad  $Q = v' \cdot A$  entonces

$$\frac{v}{t} = k \cdot A \cdot i.$$

Reemplazando  $i = \frac{h}{L}$  despejando k

$$K = \frac{v \cdot L}{A \cdot t \cdot h} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

El problema que tiene el permeámetro es que, en suelos con bajas permeabilidades, el tiempo de prueba es muy largo y este deja de ser práctico usando gradientes hidráulicos razonables, además de tener una incidencia muy importante en los resultados los fenómenos de evaporación.

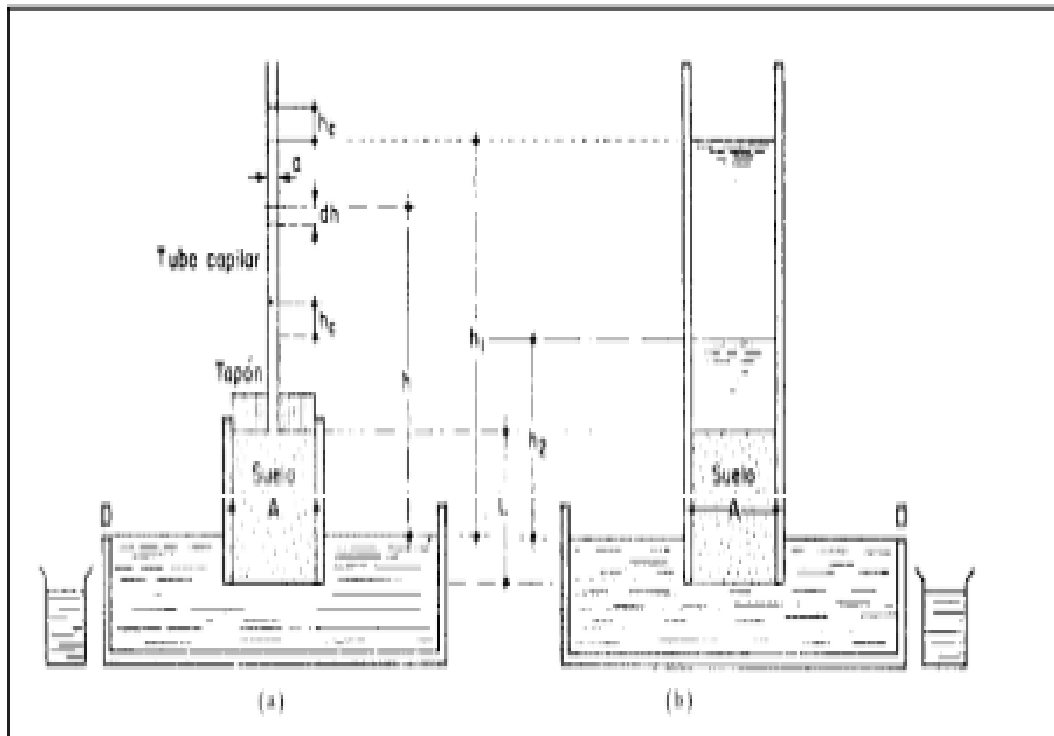


Esquema del permeámetro de carga constante

Fuente: Soto, G. 2009.

### 2.5.2 Permeámetro de carga variable

En este método el permeámetro se mide la cantidad de agua que hay en una muestra de suelo, por diferencia de niveles en un tubo alimentador. En la figura, vemos dos dispositivos típicos, el (a) usado en suelos predominantemente finos, y el (b) apropiado para materiales más gruesos.



Esquema del permeámetro de carga variable

Fuente: Soto, G. 2009

Al ejecutar la prueba se llena de agua el tubo vertical del permeámetro, observándose su decaimiento a medida que el agua atraviesa la muestra.

Dónde:

a: área del tubo vertical de carga

A: Área de la muestra

L: longitud de la muestra

h1: carga hidráulica al principio de la prueba.

h2: carga hidráulica al final de la prueba.

hc: altura de ascensión capilar, que debe deducirse de la lectura total del tubo de carga.

t: tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h1 a h2.

La ecuación que podrá calcular el coeficiente de permeabilidad después de haber hechos muchas consideraciones y reemplazando ecuaciones nos quedará de la siguiente manera:

$$K = \frac{La}{At} \ln \frac{h_1}{h_2} = 2,3 \frac{La}{At} \log \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Los permeámetros y concretamente el de carga variable, puede usarse sólo en suelos bastante permeables, generalmente arenas y limos o fusión de esos materiales, no plásticos. La permeabilidad de arcillas se calcula en laboratorio, con la prueba de consolidación.

La razón es que la poca permeabilidad de las arcillas daría lugar a tiempos de prueba tan altos que la evaporación y los cambios de temperatura producirían muchos errores. Al realizar la prueba de permeabilidad en muestras no alteradas no sólo es importante en arcillas, sino en suelos arenosos o limosos poco o nada plásticos. Estos suelos están, con frecuencia, notoriamente estratificados y, entonces,

la realización de la prueba en muestras alteradas nos facilitara una idea totalmente errónea de la permeabilidad del suelo natural. De estos suelos ligeramente plásticos se producen muestras no alteradas en sondeos de bajo costo; éstas pueden utilizarse en pruebas para calcular el coeficiente de permeabilidad en dirección paralela y normal a la dirección de la estratificación. (Souto, G. 2009).

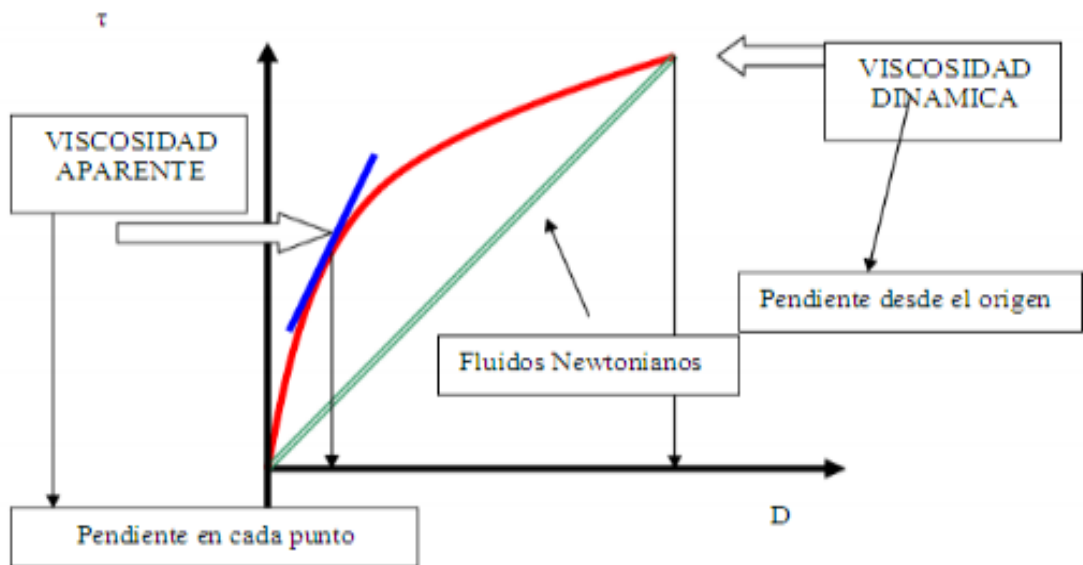
## **2.6 Tipos de viscosidades**

### **2.6.1 Viscosidad dinámica o absoluta**

La viscosidad absoluta es una propiedad de los fluidos que indica lo alto o bajo resistencia que estos presentan en el movimiento de sus partículas cuando son sometidos a un esfuerzo cortante. La Viscosidad Absoluta se denota con la letra griega  $\mu$ . (Ponce Aguirre, C. 2011)

### **2.6.2 Viscosidad aparente**

Es el cociente entre el esfuerzo cortante y la velocidad de deformación para fluidos de comportamiento no lineal. Este término se usa cuando hablas de viscosidades para fluidos no newtonianos.



Curva de fluidez para presentar la viscosidad dinámica y aparente

Fuente: Ponce Aguirre, C. 2011

### 2.6.3 Viscosidad Cinemática

En hidrodinámica las viscosidades cinemáticas actúan junto con las fuerzas debidas a la viscosidad las fuerzas de inercia, que dependen de la densidad. Por eso la viscosidad dinámica tiene un concepto muy importante referido a la densidad, o sea la relación de la viscosidad dinámica con la densidad, se denomina Viscosidad cinemática. (Solano, J. 2013)

**CAPITULO 3**  
**PARTES Y ESPECIFICACIONES**

### 3.1 Caja principal

El núcleo del yacimiento es hermetizado en la celda porta núcleo para que el gas que entre a la celda atraviese completamente la muestra, para finalmente salir a la atmosfera. Este equipo está conformado por el porta núcleo, la prensa porta núcleo, el termómetro, el Flujo metro de rango triple, el manómetro, la reguladora de presión de gas, la válvula de bola (3), y la conexión de entrada de gas, los cuales están interconectados y ensamblados en un panel o caja principal, con un marco adecuado para la instalación de pared, tal como se muestra en la figura



Partes del permeámetro de gas

**Fuente:** Calle, A ,2017



### 3.2 Accesorios

Entre los accesorios más usados del permeámetro tenemos en primer lugar 16 neplos de cobre de 1/4", cañería de cobre de 1/4", mangueras de alta presión para gas y 2 válvulas de alivio de cobre de 1/4", revise la figura 5.

Todos estos accesorios se enlazan y establecen comunicación internamente entre los instrumentos del equipo, deben estar bien ajustados colocando teflón en todas las uniones para evitar todo tipo de fugas y datos erróneos de permeabilidad.



Accesorios del permeámetro de gas

Fuente: Calle, A ,2017

### 3.3. Válvula de bola para servicios ON-OFF

#### 3.3.1 Diseño

Las válvulas de bola blancas proporcionan lo último en resistencia a la corrosión y confiabilidad en un diseño de acción rápida y de flujo completo.

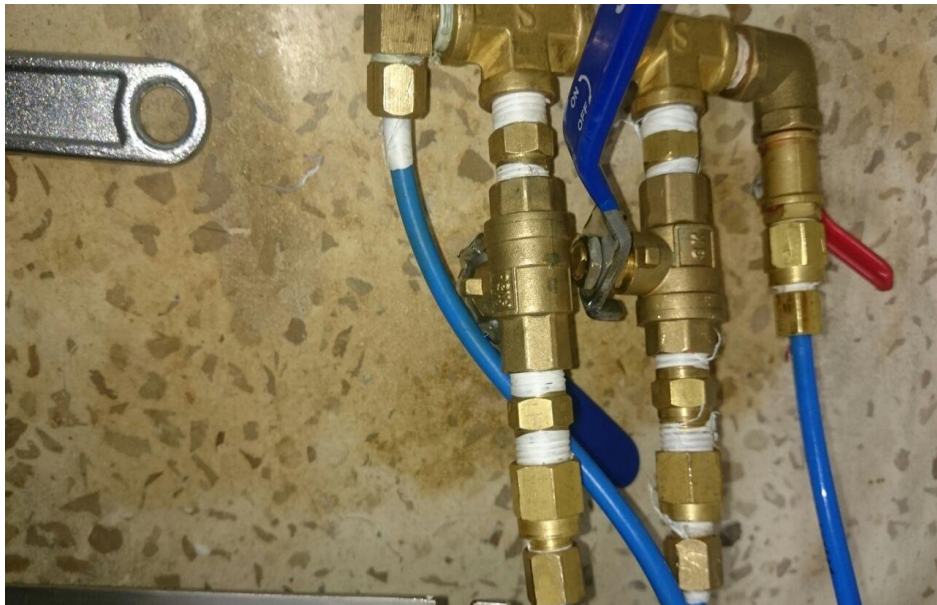
Los sellos de empaque TFE de carga superior exclusivos están herméticos a altas o bajas presiones de operación. La presión del sistema no es necesaria para hacer el sello. Dado que el sello de empaque TFE llena todos los huecos dentro del cuerpo de la válvula, no hay roscas ni cavidades internas para atrapar fluidos en proceso. Esto evita que fluidos y contaminantes sean transportados cuando se requiere limpieza o cambio del sistema. Los anillos de metal de retención evitan que el empaque TFE fluya en frío en los puertos de las válvulas. ("Whitey ball valves", 1973)

### **3.3.2 Aplicaciones**

- |  |                     |
|--|---------------------|
| -Todos tipos de instrumentos                 | -Tienda de aire     |
| -Laboratorios y tiendas                      | -Paneles de control |
| -Refinerías                                  | -Análisis de gases  |
| -Tubería hidráulica y neumática<br>alimentos | -Procesamientos de  |
| -Cromatografía                               | -Puestos de prueba  |

### 3.3.3. Características especiales

- Caída de presión muy baja para el flujo total
- Topes mecanizados positivos en posiciones abiertas y cerradas
- No hay cavidades internas para atrapar los fluidos en proceso
- Barra compacta y rígida de una sola pieza
- Fácil de limpiar y rodable
- Los sellos de empaque TFE están ajustables sin quitar la válvula del sistema



Válvula de bola para servicio ON-OFF

**Fuente:** Calle, A ,2017

### **3.4 Regulador de presión de gas**

El regulador de presión es un equipo de control de flujo diseñado para mantener una presión constante, Son independiente de las variaciones de presión a la entrada o los cambios de requerimientos de flujo. La “carcaza” y los mecanismos internos que componen un regulador, controlan o limitan las variaciones de presión a un valor previamente definido. Existen diferentes, marcas, estilos y aplicaciones para la industria del Gas Metano. Muchos tipos están constituidos por contenedores autocontrolados que funcionan midiendo la presión de línea y manteniéndola en el valor fijado, sin importar las fuentes externas de energía. Otros modelos requieren de una fuente externa para la ejecución de su función de control de la presión.

Un regulador básicamente es una válvula de recorrido bien ajustada conectada mecánicamente a un diafragma. El diafragma se pone en equilibrio con la presión de salida o presión de entrega y por una fuerza que esta aplicada del lado contrario, a la cara que tiene contacto con la presión de salida. La fuerza aplicada del lado contrario al diafragma puede ser suministrada por un resorte, un peso o presión aportada por otro instrumento denominado piloto. (Rendón, J. 2006)



Regulador de presión NORGREN R07-200-RNKA

**Fuente:** Villavicencio Julio, Leon Diego, 2016

### **3.5 Celda porta núcleos**

La celda porta núcleo está compuesta en su parte interna por un caucho el cual es usado para hacer de función de capa impermeable en los yacimientos de hidrocarburos, esta capa impermeable impide que, del gas, petróleo y/o agua se filtren en el núcleo; y junto con el núcleo, simularíamos un reservorio de hidrocarburos a escala.

Para las pruebas de laboratorio de permeabilidad, las muestras de roca (plugs) generalmente están esquematizadas en cortes cúbicos o cilíndricos de fracciones de los núcleos del campo los cuales son extraídos por varios métodos, a continuación, se citan algunos:



Celda porta núcleo.

Fuente: Calle, A ,2017

### **3.5.1 Sistema *CoreDrill***

La extracción de muestras cuando hay una perforación produce altos rendimientos operativos, rápidos cambios de herramientas, sin necesidad de hacer viajes para traer las tuberías para obtener las muestras, con mínima interrupción del proceso de perforación.

### **3.5.2 Sistema de Obtención de Datos in Situ**

Producen muestras de mejor calidad, libres de fracturas mecánicas o por sobrepresión, invasión de fluidos o pérdidas de líquido del yacimiento. Los fluidos del reservorio se acumulan bajo presión dentro

de la muestra de roca. Los núcleos cilíndricos permiten la determinación de la permeabilidad en una dirección. Mientras que los núcleos cúbicos permiten calcular la permeabilidad en tres direcciones. Luego se remueve todas las trazas de petróleo de la muestra y se lo deja bien seco. Los solventes normalmente usados para esta extracción son el tricloro-etileno, tolueno, éter, o pentano. En este caso los cores delicados o frágiles, que pueden cambiar su forma mediante lijada pueden dañarse o aplastarse cuando se ponen en la celda porta núcleo, entonces para evitar este problema primero se sumergen en cera y luego son metidos en camisas metálicas, para posteriormente introducirlos en la porta núcleo. (Tutiven Delgado, Iñiga Uguillés, & Gallegos O., 2006)



Brocas para extraer núcleos

**Fuente:** Tutiven Delgado, Iñiga Uguillés, & Gallegos O., 2006

### **3.6 Bombona de gas**

El suministro de presión se puede sustituir mediante bombonas de gas este puede ser de nitrógeno ( $N_2$ ) que es el más recomendado o de dióxido de carbono ( $CO_2$ ).

Todos los reservorios mantienen el gas comprimido o energía almacenada para ser usados en operaciones industriales o de laboratorio, también están equipadas con una válvula reguladora de presión que depende del tipo de gas. Para el nitrógeno la escala del regulador es de 0 - 500 psi.

Cuando hay un amplio rango de regulación es necesario usar otro regulador en el permeámetro, debido a que el equipo maneja valores pequeños de presión (o de precisión) en relación a la generada por la bombona. (Tutiven Delgado, Iñiga Uguillés, & Gallegos O., 2006)





Bombona de gas

**Fuente:** Tutiven Delgado, Iñiga Uguillés, & Gallegos O., 2006

### 3.7 Manómetro

El manómetro es un instrumento usado para la medición de la presión en los fluidos, normalmente calculado de la diferencia de la presión entre el fluido y la presión local. La presión se mide en atmósferas (atm); en el sistema internacional de unidades (SI), la presión se puede expresar en newtons por metro cuadrado; un newton por metro cuadrado es 1 pascal (Pa).

La atmósfera en pascales se mide como 101.325 Pa, y este equivale a 760 mm de mercurio en un barómetro convencional.

Cuando los manómetros indican fluctuaciones rápidas de presión se usan sensores piezoeléctricos o electrostáticos que facilitan una respuesta instantánea. Hay que darse cuenta que en la mayoría de los manómetros se miden la diferencia entre la presión del fluido y la presión atmosférica local, por lo tanto, hay que sumar ésta última al valor indicado por el manómetro para hallar la presión absoluta. Cuando el manómetro obtiene una medida negativa es debido a un vacío parcial. (Villa, J. 2005).



Manómetro

**Fuente:** Calle, A ,2017

# **CAPITULO 4**

## **PROCEDIMIETO Y PRUEBA DE LABORATORIO**

#### **4.1 Limpieza de núcleo con tolueno**

1. Armar el equipo soxlteh, el cual está conformado por:

-Reverbero o manto de calentamiento.

-Balón (500 o 1000 ml.), lleno con 375 ml. de tolueno o éter.

-Porta muestra.

-Refrigerante.

-Soporte universal.

-Colocar lubriscal en todas las uniones.

2. Dejar las muestras con el reverbero a su máxima capacidad el tiempo necesario, hasta que los núcleos estén completamente limpios (tolueno limpio).

3. Poner las muestras en el horno convencional a una temperatura de 85 °C (185 °F) por un lapso de tiempo de 6 a 12 horas.

4. Colocar las muestras en el horno de vacío a una temperatura de 82 °C (180 °F) por un intervalo de tiempo de 6 a 18 horas. P = 20 psi.

5. Dejar los plugs en el desecador hasta el momento en el que se les vayan a determinar la permeabilidad



Limpieza de núcleo con tolueno

Fuente: Calle, A ,2017

#### **4.2 Procedimiento para determinar la permeabilidad absoluta de muestras de roca**

- 1.- Medir la longitud y el área de sección transversal de la muestra a la cual se le requiere hallar la permeabilidad
- 2.- Poner el plug en el caucho luego colocarlos en la celda porta núcleo y ajustar este último al equipo por medio de la prensa porta núcleo
- 3.-Abrir la válvula de paso en la bombona de gas, después gire la válvula reguladora de presión del tanque en el sentido de las manecillas del reloj hasta alcanzar una presión entre 25 y 45 psi
- 4.- La válvula de bola es la que da paso para que el gas llegue al Flujometro debe ubicarse en "large" (L), y abrir la válvula reguladora de presión del permeámetro lentamente hasta que el manómetro lea 0.25 atm (en el manómetro se denota con una L). Es aconsejable golpear ligeramente el vidrio del manómetro mientras se está ajustando la presión.

El rango adecuado en los tubos medidores de caudal es entre 20 y 140 divisiones. Si el flotador (esfera negra) en el tubo large pasa las 20 divisiones, entonces tome la correspondiente lectura. Si se mantiene por debajo debe colocar la válvula de bola en posición “médium” y aumente la presión a 0.5 atm (M) por medio del regulador. Si la esfera plateada sobrepasa las 20 divisiones tome apunte de la altura alcanzada por la esfera roja.

5.-Con el dato de longitud obtenido en el paso anterior de los Flujometro debe dirigirse a la carta de longitud vs caudal (figura 12). En esta carta debe ingresar con el valor de la longitud horizontalmente hasta topar con cualquiera de las tres curvas dependiendo de la presión y luego baje verticalmente para obtener q en cc/seg.

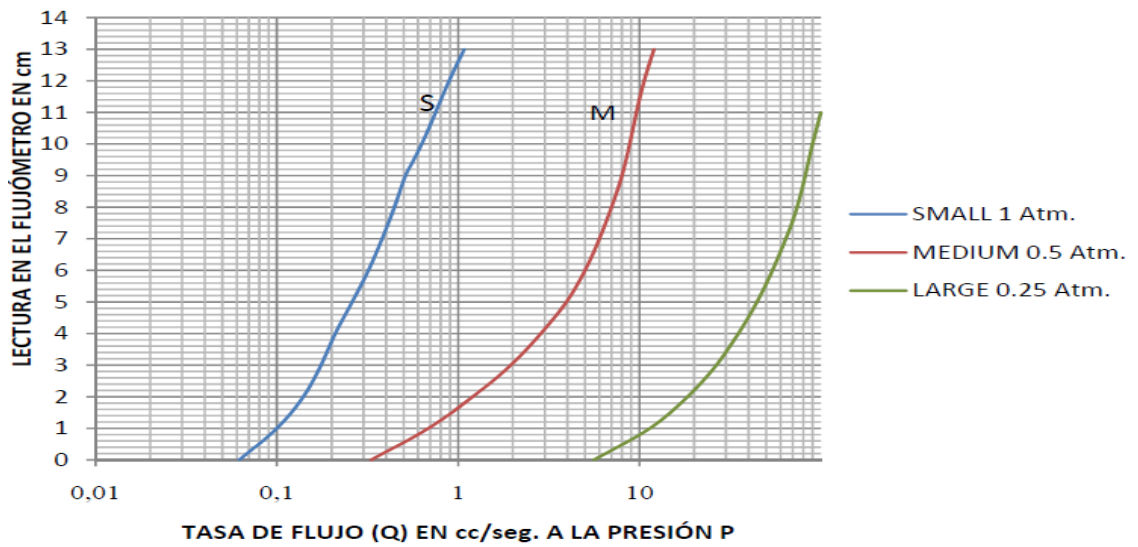
6.- Leer la temperatura en el termómetro y hallar la viscosidad en la figura 13

7.-Con los datos de longitud, área presión, caudal y viscosidad calcule la permeabilidad por medio de las ecuaciones 1,2 y 3

Flujometro large (0.25 atm)      $k=4\frac{\mu ql}{A}$      Ecuación 1

Flujometro Medium (0.5 atm)      $k=2\frac{\mu ql}{A}$      Ecuación 2

Flujometro Small (1 atm)      $k=\frac{\mu ql}{A}$      Ecuación 3



Viscosidad del aire y nitrógeno en función de la temperatura

Fuente: Ardila, M. and Arena, F. (2010).

### VISCOSIDAD DEL GAS

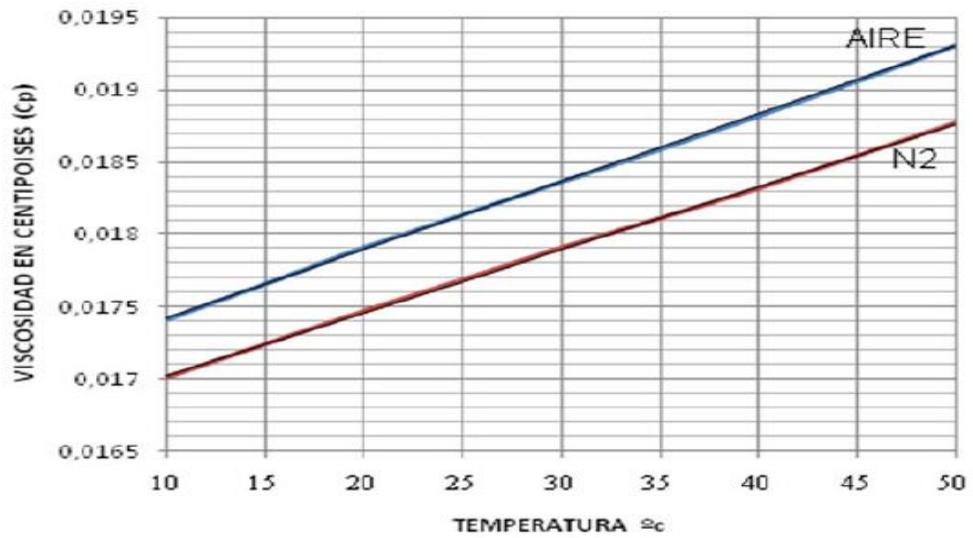


Figura 1 Carta de calibración de los rotámetros Q vs Cm

Fuente: Ardila, M. and Arena, F. (2010).

# **CAPITULO 5**

## **VALIDACION DEL EQUIPO**



## **Introducción**

Es esencial cuando se repara o modifica un equipo o ya sea si se desarrolla un nuevo método, proceder a la validación de los ensayos a realizarse a través de los mismos. Pero que es validación, podríamos definirla como “La confirmación mediante examen y suministro de evidencia objetiva de que se cumplen los requisitos particulares para un uso específico previsto “.

En este capítulo desarrollaremos la validación del permeámetro a los gases que ha sido reparado y modificado. De acuerdo al servicio de acreditación ecuatoriano (SAE), los requisitos para que un nuevo método y/o equipo sea validado se deben verificar los siguientes factores.

Repetibilidad

Reproducibilidad

Exactitud

Intervalo de trabajo

Existen dos puntos que son un poco más complicados de determinar, estos son:

Límite de detección

Límite de cuantificación.

## **5.1 Robustez del método**

Es la capacidad del método para no ser afectado por métodos externos como la temperatura del ambiente del laboratorio, las condiciones del analista o cualquier otro factor que sobre el cual no podamos mantener un estricto control o no incida directamente en el ensayo.

Quizás el factor externo que pueda afectar al ensayo es la temperatura externa del cilindro de gas, sin embargo, se tomaron todas las consideraciones necesarias para que las condiciones del tanque sean las mismas siempre, ya sea realizando los ensayos a la misma hora del día, así como también cubriendo el tanque para que no sea afectado.

## **5.2 Repetibilidad**

Se considera la Repetibilidad como la capacidad de repetir una medición, bajo el mismo método y las mismas condiciones. Para la Medición de la permeabilidad a los gases, de la muestra se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones.

**Tabla I.** Datos para calcular permeabilidad

Presión de ensayo	0.25 atm
Temperatura ambiente	27 °C
Temperatura del gas	31 °C
Viscosidad gas @31 °C	0,0179 cp.
Longitud de núcleo	4,56 cm
Diámetro del núcleo	2,4 cm
Gas	N2 (seco)
Peso del núcleo (seco)	28 g

### **5.3 Reproducibilidad**

Se considera la reproducibilidad como la capacidad de reproducir una medición, bajo las mismas condiciones externas, variando uno o más factores, pero manteniendo un control sobre ellas.

Por lo general las condiciones de reproducibilidad se prueban cambiando el analista para desarrollar el mismo ensayo. Para llevar a cabo esta medida solicité la colaboración de otra persona que será denotada como (Analista 2).

#### 5.4 Determinación de Repetibilidad y Reproducibilidad

Para la determinación de estos valores se utilizará el método de promedios y rangos. Es necesario mencionar que el número de medidas realizadas serán 10 ensayos por día y/o por analista.

Los ensayos se realizaron los días 23 y 24 de febrero del presente año. Los resultados finales obtenidos por los analistas fueron los siguientes

**Tabla II.** Datos de permeabilidades obtenidas por el tesista y analista

	<b>Permeabilidad (md)</b>	<b>Permeabilidad (md)</b>
	<b>Tesista</b>	<b>Analista 2</b>
	445.12	445.26
	445.21	445.12
	445.16	445.16
	445.19	445.13
	445.32	445.18
	445.22	445.12
	445.22	445.16
	445.23	445.11
	445.12	445.16
	445.16	445.15
<b>Promedio</b>	445.195	445.155

Conociendo estos datos se realizará el cálculo del rango de trabajo de cada analista, que consiste en la diferencia entre el máximo valor leído y el mínimo valor leído.

Rango Tesista = 0.2 mD

Rango Analista 2 = 0.15 mD

Con estos datos se calcula el rango promedio que utilizaremos posteriormente.

$$R_{prom} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad \text{Ecuación 5.1}$$

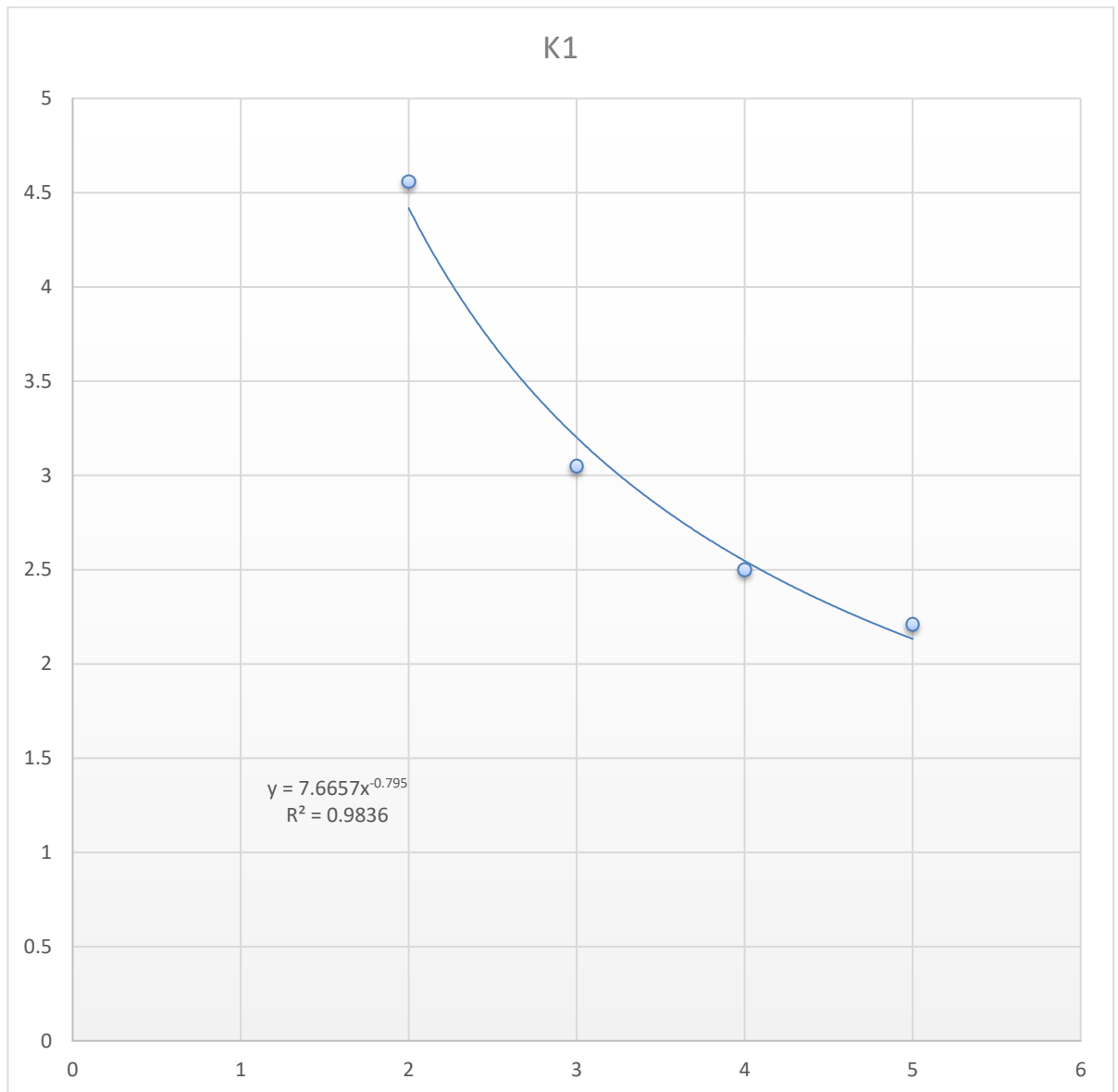
$$R_{prom} = 0.175 \text{ mD}$$

Conocido este valor, nos permite calcular el % de Repetibilidad

$$\%Repetibilidad = \frac{K_1 R_{prom}}{T} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.2}$$

K1 se define como una constante relacionada directamente con el número de mediciones y es el valor que proporciona el intervalo de confianza cercano al 99%. Los valores de K1 vienen generalmente tabulados para un número de ensayos realizado, pero como lo aconseja el Servicio de Acreditación Ecuatoriano y las normas pertinentes, se debe realizar una extrapolación para números de ensayos que no estén tabulados

$$\%Repetibilidad = \frac{R_{prom}}{T} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.3}$$



Extrapolación de números de ensayos no tabulados para cálculos de k1

**Fuente:** Calle, A ,2017

Del gráfico obtenemos la ecuación  $y = 7.6657 x^{-0.765}$ , y reemplazando la x por el número de ensayos realizados ( $x=10$ ), obtenemos que el valor de K1 para 10 ensayos es 1.228999819.

Lo que en conjunto con los valores añadidos anteriormente nos da un valor de Repetibilidad de 4.301499%.

La tolerancia Utilizada en este caso, debido al poco rango de los datos obtenidos fue de 5 mD.

Para calcular el valor de reproducibilidad tenemos la siguiente ecuación.

$$\% REproducibilidad = \sqrt{\frac{(k_2 \times D_{prom})^2 - \frac{(k_1 R_{prom})^2}{n}}{T}} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.4}$$

De donde ya conocemos el valor de algunas variables. DE aquellas variables se puede decir lo siguiente:

K2 al igual que K1 son valores tabulados e indican la confianza de los rangos trabajados por los distintos analistas; XDprom es el promedio de los valores obtenidos por ambos analistas; y n es el número de ensayos por analista.

Mencionado esto tenemos que:

Para calcular K2 seguimos un procedimiento al empleado para calcular K1:

**Tabla III.** Numero de ensayos

N ENSAYOS	k2
2	3.65
3	2.7
4	2.3
5	2.08

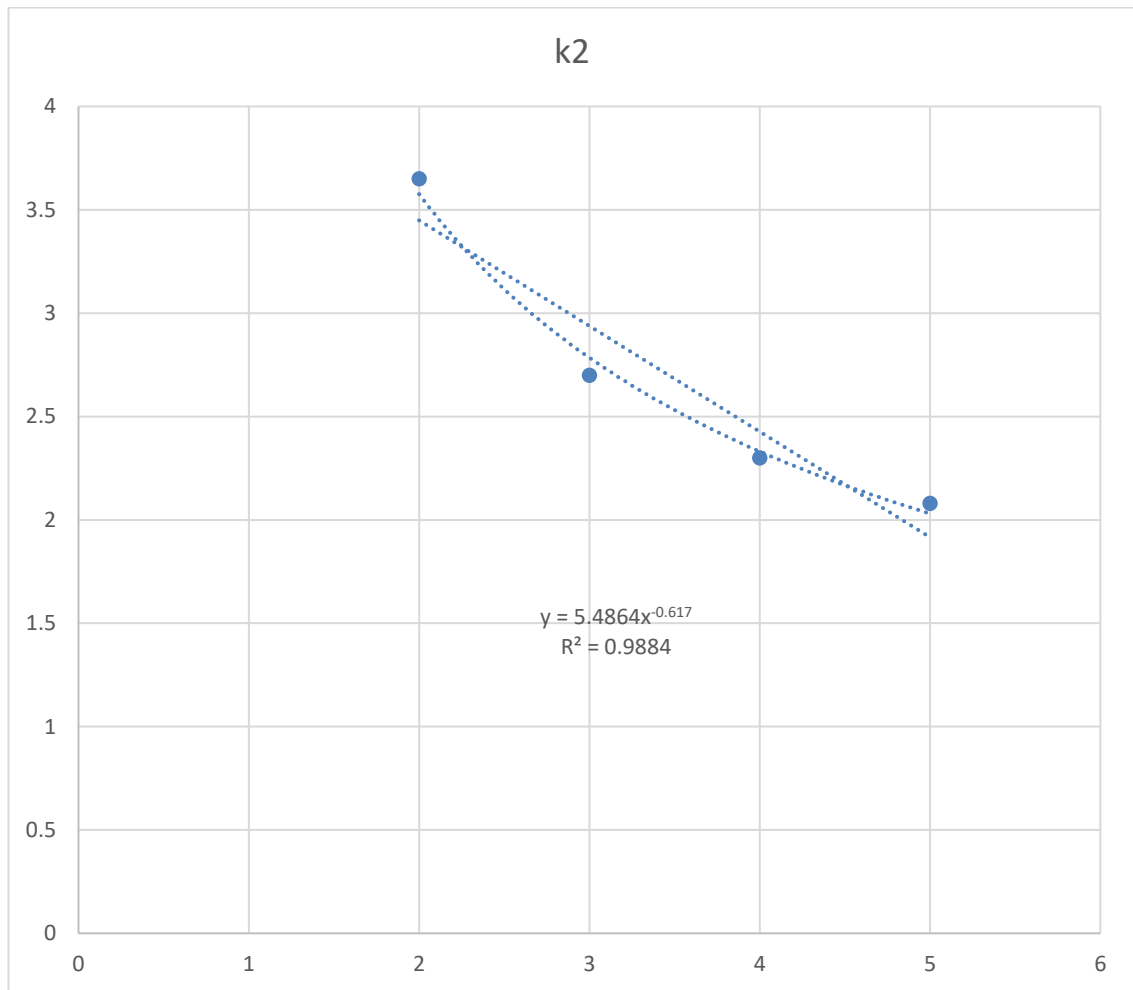


Gráfico 2 Extrapolación de números de ensayos no tabulados para cálculos de  $k_2$

**Fuente:** Calle, A ,2017

Sin embargo, en este caso al tratarse de un solo equipo, pero con dos analistas, es necesario asumir un  $n=2$  y utilizar el valor de 3.65 para  $K_2$ .

Con todo lo mencionado anteriormente obtenemos como resultados de Reproducibilidad lo siguiente:



**Tabla IV:** Tabla de resultados de reproducibilidad

TOLERANCIA	5 mD
Xi rpom O1	445.195
Xi rpom O2	445.155
XD prom	0.04
%REPRODUCIBILIDAD	2.757037

Finalmente procedemos a calcular el valor de %R&R que nos permitirá conocer la confianza final que brinda el equipo tanto al laboratorio como al cliente final.

$$\%R\&R = \sqrt{\%Repetibilidad^2 + \%Reproducibilidad^2} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

Lo que nos da como resultado final un valor de %R&R = 5.1092222246

La norma 17025 nos indica lo siguiente:

Para valores de %R&R menores que 10 el sistema de medición es aceptable, si esta entre 10 y 30 puede ser aceptable según la aplicación que se le vaya a dar, pero si es mayor que 30 el equipo o sistema de medición no es apto para realizar el trabajo.

### 5.5 Determinación de la exactitud del resultado

Para verificar la precisión del resultado obtenido se realizará un estudio comparativo entre los resultados obtenidos por el tesista y los datos del núcleo que fueron proporcionados por el analista.

**Tabla V.** Tabla de resultados de permeabilidad

	Tesista	Analista 2
	Md	mD
1	445.12	445.26
2	445.21	445.12
3	445.16	445.16
4	445.19	445.13
5	445.32	445.18
6	445.22	445.12
7	445.22	445.16
8	445.23	445.11
90	445.12	445.16
10	445.16	445.15
MEDIA	445.205714	445.155
DESV.EST.	0.06214423	0.04326918
VARIANZA	0.0038619	0.00187222
N	10	10
G.L.	9	9
F CAL. =	2.062738448	
F TAB. =	2.44	
	F CAL. < F TAB.	
s2 =	0.002867063	
t CAL. =	2.117857132	
t TAB. =	2.2	
G.L. =	18	
NIVEL DE CONFIANZA=	95	
	t CAL. < t TAB.	

Una comparación que nos sirve para decir que el equipo funciona bien, es compararlo con los valores previamente existentes del núcleo ( $K = 445.03$  mD) que nos sirve como referencia comparándolo con la media obtenida por nuestros resultados.

Esto lo podemos realizar usando las siguientes ecuaciones.

$$\frac{\text{Exactitud}}{\text{Verdad}} = \frac{V_R - X_{prom}}{V_R} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$$\text{recuperación (\%)} = \frac{X_{prom}}{V_R} \times 100 \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Resolviendo estas ecuaciones tenemos que la relación exactitud veracidad es de 0.03% y el porcentaje de recuperación es de 100.03%

### **5.6 Determinación del límite de cuantificación**

Es el mínimo valor cuantitativo que se puede determinar dentro de un nivel de confianza específico. Para obtener este valor en primer lugar debemos determinar la desviación estándar, y se rige bajo la ecuación.

$$LOC = X_{prom} + 10\sigma \quad \text{Ecuación 5.8}$$

Por lo tanto, tenemos que el LOC para nuestro equipo es.  $LOC = 445.8271565$ .

Es importante mencionar que este valor teórico no es necesariamente real, debido a que en la realización de los ensayos no contamos con muchas muestras.

# **CAPITULO 6**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACION**

## 6.1 Conclusiones

-El equipo está apto para realizar ensayos en el laboratorio, los resultados del análisis de Repetibilidad y reproducibilidad nos muestran con el valor obtenido de 5.109% que el equipo es completamente útil para el fin en el que se lo requiere emplear

-Se cumplió con todos los parámetros de validación de manera que la rehabilitación del permeámetro de gas se realizó de manera correcta

-Los datos de los operadores en esta ocasión el tesista y el analista se consideran igual de precisos, esta conclusión se corrobora aplicando la prueba de estadística F-Fisher, en el cual se determinó que el F calculado es menor que el F tabulado.

-La hoja técnica del regulador R07, nos sirvió para calibrar el regulador y verificar que se encontraba en buen estado, puesto que una vez establecida la presión no hubo variaciones de presión durante la prueba de inyección de gas.

-La norma ASME B 31.8, nos permitió comprobar que todo el sistema compuesto por las mangueras de altas presión, Manómetro y el regulador de presión R07 se encontraban en buen estado debido a que durante la prueba de inyección de gas no presentó ninguna caída de presión.

-Las normas API ESTANDAR 598, nos permitió corroborar que el mantenimiento ejecutado en las válvulas de alivio se realizó de manera correcta debido a que no hubo fugas durante la prueba de inyección de gas

## **6.2 Recomendaciones**

-Como recomendación sería de gran importancia poder contar con mayor cantidad de muestras para poder determinar de mejor manera los Límites de detección y cuantificación.

-Una recomendación para que no haiga problemas en las pruebas de laboratorio es utilizar mangueras de alta presión en vez de cañerías de cobre

-Se recomienda dar constantemente mantenimiento al equipo y mantenerlo en un soporte fijo para la ejecución de trabajos de rapidez y calidad

- En cada paso durante el desarrollo de nuestro proyecto se debe tomar en cuenta todas las disposiciones de seguridad proporcionada por la norma API RP 40, que está vinculada con las diversas prácticas de laboratorio para núcleos de perforación.

## **BIBLIOGRAFIA**

Hurst, S., Ayan, C., Pop, J., Peter, J., Kuchuc, F., Hafez, H. and O'Callaghan, A. (2001). Characterizing Permeability with Formation Testers (Oilfield Review) | Schlumberger.

Ponce, S. (2011). La Viscosidad. Scribd.

Sola, J. (2013). 1.7 Viscosidad cinemática Scribd

Torres, V. (2008). Porosidad de Yacimientos de petróleo.

Souto, G. (2009). Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad. MECASUR.

Angelone, S., Garibay, M. and Cauchape, M. (2006). Permeabilidad en suelos. fceia.

Ludwing, H. (1998). Glosario: Validación de métodos. Greenfacts.org.

Gestion-Calidad.com, A. (2016). Calibración. [online] Gestión-Calidad.com.

Tutiven Delgado, J., Iñiga Uguillés, F. and Gallegos O., R. (2006). De un permeámetro de gas y operación y calibración de la celda triaxial. Dspace.espol.edu.ec.



Ardila Mateus, M. and Arenas Rueda, F. (2017). METODOLOGIA PARA EL ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS DEL LABORATORIO DE ANALISIS PETROFISICOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS. Repositorio.uis.edu.co.

Definista, C. (2015). ¿Qué es Corrosión? - Su Definición, Concepto y Significado. ConceptoDefinicion.

Villa, J. (2005). Manómetro. Fluidos.eia.edu.co.

Rendón, J. (2006). REGULADORES DE PRESION. oil production.

Available

Servicio de Acreditación, E. (2016). Validación de Métodos. *Validación de Métodos*, (pág. 33). Guayaquil

"Whitey ball valves", (1973). Válvula de bola para servicios ON-OFF