

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Acondicionamiento, Operación y Calibración del Limpiador de Núcleos con Dióxido de Carbono del Laboratorio de Ingeniería en Petróleo de la ESPOL”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO EN PETRÓLEO

Presentada por:

Colón Eloy López Franco

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis hermanos(as) por su ayuda incondicional, a mis tíos(as), primos(as) y amigos(as) por la colaboración recibida.

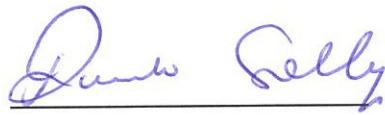
Al Ing. Ricardo Gallegos Orta Director de Tesis, Ing. Daniel Tapia y al Ing. Héctor Román por guiarme en la elaboración de este trabajo, al Sr. Iván Guzmán y a la ESPOL por su invaluable ayuda.

DEDICATORIA

A mis padres, quienes en vida fueron Amada Franco V. y Colón López L.

A mis hermanas, Yadira y Verónica López Franco que han sido el motor que me ha impulsado a lo largo de mi formación personal y académica.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



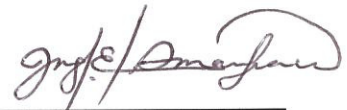
Ing. Ricardo Gallegos O.
DECANO DE LA FICT
PRESIDENTE
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Daniel Tapia F.
MIEMBRO PRINCIPAL



CIB -ESPOL



Ing. Hector Roman F.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Colón E. López F.

RESUMEN

Este trabajo trata sobre la restauración, elaboración de la documentación técnica y determinación del nivel de limpieza del limpiador de núcleos con dióxido de carbono (CO_2), cuya utilidad no ha podido ser debidamente aprovechada por falta de información técnica y desconocimiento del procedimiento de operación de éste equipo. Para ello, ha sido necesario el chequeo minucioso del equipo, la recopilación de la información técnica obtenida de los fabricantes de las partes que lo conforman y muchas horas de pruebas de laboratorio, cuyos resultados considerados exitosos señalan un nivel de limpieza promedio del 97.64 %. El limpiador de núcleos con CO_2 , es capaz de realizar la limpieza simultánea de hasta 50 núcleos (plugs) saturados con fluidos originales del yacimiento petrolífero del cual hubieren sido extraídos. El lavado se realiza mezclando dos solventes, tolueno y dióxido de carbono, que a presión y temperatura atmosférica se encuentran en estado líquido y gaseoso respectivamente, para formar una mezcla homogénea de ambos fluidos, éstos son sometidos a una presión tal que el CO_2 se condensa y se mezcla con el tolueno dentro de una cámara de alta presión en la que previo a la presurización se colocan los núcleos a ser lavados.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. MARCO REFERENCIAL.....	3
1.1. Descripción general del equipo.....	3
1.2. Situación técnica encontrada del equipo y objetivos del tema.....	5
CAPITULO 2	
2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	9
2.1. Limpieza del núcleo y su importancia.....	10
2.2. Porosidad, permeabilidad y saturación como características fundamentales de los núcleos a ser lavados.....	13

2.3. Influencia de la presión capilar y fluidos irreductibles en la limpieza de los núcleos.....	21
2.4. Aspectos básicos teóricos de los gases y la importancia del CO ₂ en el proceso de lavado de núcleos.....	24
2.5. El tolueno como agente de limpieza.....	35

CAPITULO 3

3. CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO.....	39
3.1. Especificaciones técnicas del equipo y sus partes.....	39
3.1.1 Cámara de alta presión.....	41
3.1.2 Bomba de alta presión.....	43
3.1.3 Sistema de medición y líneas de alta presión.....	54
3.1.4 Sistema de despresurización, válvulas y accesorios.....	61
3.1.5 Bombona de gas CO ₂	77
3.2. Mantenimiento.....	79

CAPITULO 4

4. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN Y PRUEBAS DE LABORATORIO.....	82
4.1. Características físicas y visuales de los núcleos antes y después de ser limpiados.	85
4.2. Calibración y ajustes.....	87
4.3. Procedimiento para realizar la limpieza de núcleos.....	89

4.4. Procedimiento de despresurización o alivio del sistema.....	94
4.5. Pruebas de laboratorio y resultados obtenidos.....	96
4.6. Análisis de los resultados obtenidos.....	118
4.7. Manual de procedimiento o guía del usuario.....	126

CAPITULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	131
---	------------

ANEXOS

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

atm	Atmósferas
API	American Petroleum Institute
Bbls	Barriles
°C	Grados centígrados
CIGQ	Centro de Investigaciones Geológicas Quito
cm	Centímetro
cm ²	Centímetros cuadrados
cm ³	Centímetros cúbicos
CO ₂	Dióxido de carbono
C ₇ H ₈	Tolueno
cp	Centipoises
etc	Etcétera
ft	Pies
ft ²	Pies cuadrados
Fig	Figura
g	Gramos
gal	Galones
K	Kelvin
KJ	Kilo joules
lbs	Libras
LN	Limpiador de núcleos
m ³	Metros cúbicos
md	Milidarcys
mg	Miligramos
ml	Mililitros
mol	Moles
ppm	Partes por millón
prof	Profundidad
psia	Libras por pulgadas cuadradas absolutas
psi	Libras por pulgadas cuadradas medidas
PVT	Presión, volumen, temperatura
RCP	Respiración Cardiopulmonar
TNT	Trinitrotolueno

SIMBOLOGÍA

A	Área
A_1	Área del pistón de la sección de aire
A_2	Área del pistón de la sección hidráulica
F	Fuerza
k	Permeabilidad
k_{abs}	Permeabilidad absoluta
l	Litros
L	Distancia recorrida por el flujo
m	Masa
m.n.sat	Masa del núcleo saturado
m_{oi}	Masa de petróleo inicial
m_{or}	Masa de petróleo residual
m_{wi}	Masa de agua inicial
m_g	Masa del grano
n	Número de moles
M	Masa molar
P	Presión
P_c	Presión crítica
P_r	Presión reducida
P_1	Presión en la sección de aire
P_2	Presión en la sección hidráulica
Q	Tasa de flujo
R	Constante universal de los gases
S	Saturación
S_o	Saturación de petróleo
S_{oi}	Saturación de petróleo inicial
S_{or}	Saturación de petróleo residual
S_{wc}	Saturación de agua connata
S_{wirr}	Saturación de agua irreductible
SG	Gravedad específica del fluido
SG_o	Gravedad específica del petróleo
T	Temperatura absoluta
T_c	Temperatura crítica
T_r	Temperatura reducida
V	Volumen
V_c	Volumen crítico
V_f	Volumen de fluido
V_{gas}	Volumen de gas
V_g	Volumen de granos

V_o	Volumen de petróleo
V_{oi}	Volumen de petróleo inicial
V_{or}	Volumen de petróleo residual
V_{orem}	Volumen de petróleo removido
V_p	Volumen poroso
V_r	Volumen reducido
V_t	Volumen total
V_w	Volumen de agua
V_{wi}	Volumen de agua inicial
W	Peso
W_{f1}	Peso final de los núcleos al término del primer ensayo
W_{f2}	Peso final de los núcleos al término del segundo ensayo
W_i	Peso de los núcleos previo al lavado
W_s	Peso de los núcleos resaturados
z	Factor de compresibilidad del gas
μ	Viscosidad
ρ	Densidad
ρ_{gr}	Densidad de granos
ρ_o	Densidad del petróleo (a condiciones estándar)
ρ_w	Densidad del agua (a condiciones estándar)
ρ_{wi}	Densidad del agua inicial
α	Angulo con respecto a la vertical
ϕ	Porosidad
ϕ_e	Porosidad efectiva
#	Número
"	Pulgadas

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Limpiador de núcleos 1988.....6
Figura 1.2	Equipo en el inicio del proyecto.....6
Figura 1.3	Orificio encontrado en la tapa de la cámara de alta presión.....7
Figura 2.1	Tubos de aluminio porta muestras.....10
Figura 2.2	Tubo de aluminio abierto y testigo aún con fluido de perforación.....11
Figura 2.3	Representación de la porosidad en una roca.....15
Figura 2.4	Experimento de Darcy para determinar la permeabilidad.....17
Figura 2.5	Distribución de los fluidos en la roca.....24
Figura 2.6	Presión reducida vs. factor de compresibilidad.....30
Figura 2.7	Enlaces del CO ₂32
Figura 2.8	Diagrama de fases del CO ₂33
Figura 3.1	Partes del equipo.....40
Figura 3.2	Vista en planta de la cámara de alta presión.....42
Figura 3.3	Accesorios de la tapa de la cámara de alta presión.....43
Figura 3.4	Bomba hidráulica MCP-36 de acción neumática.....44
Figura 3.5	Diagrama externo de la bomba.....45
Figura 3.6	Esquema interno de la bomba hidráulica.....46
Figura 3.7	Esquema interno de la sección de aire.....51
Figura 3.8	Esquema interno de la sección hidráulica.....53
Figura 3.9	Filtro de línea de succión de la bomba.....54
Figura 3.10	Medidor de presión a 1200 psi.....57
Figura 3.11	Detalles del mecanismo del manómetro.....59
Figura 3.12	Línea de flujo y accesorios.....61
Figura 3.13	Línea y válvula de recirculación.....63
Figura 3.14	Partes internas de la válvula de recirculación.....63
Figura 3.15	Válvula de tres vías de la cámara de alta presión.....66
Figura 3.16	Diagrama de la válvula whitey/swagelok de tres vías y posiciones de flujo.....67
Figura 3.17	Válvula de alivio instalada sobre la tapa de la cámara.....68
Figura 3.18	Configuración interna de válvula de alivio.....69
Figura 3.19	Regulador conectado a una fuente de aire.....70
Figura 3.20	Partes internas del regulador de aire.....71
Figura 3.21	Entrada de líquido al pulsation dampener.....75
Figura 3.22	Válvula check de 1/8" de diámetro interno.....76
Figura 3.23	Mecanismo interno de la válvula check.....76

Figura 3.24	Entrada de CO ₂ desde la bombona.....	78
Figura 3.25	Entrada y salida de aire de la bomba.....	80
Figura 3.26	Partes internas de la bomba.....	80
Figura 3.27	Tapa de la sección neumática de la bomba.....	81
Figura 4.1	Extractor soxhlet lavando núcleos.....	84
Figura 4.2	Maya de nylon con núcleos.....	90
Figura 4.3	Numeración de las válvulas.....	91
Figura 4.4	Núcleos utilizados en pruebas preliminares.....	105
Figura 4.5	Porosímetro y celda triaxial del CIGQ.....	112
Figura 4.6	Núcleos saturados donados por el CIGQ (Antes).....	118
Figura 4.7	Núcleos donados lavados en el limpiador de núcleos con CO ₂ de la ESPOL (Después).....	118
Figura 4.8	Variación del peso de los núcleos luego de cada ensayo preliminar.....	122
Figura 4.9	Nivel de limpieza alcanzado con ambos métodos.....	123

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Resultados de la primera prueba preliminar.....106
Tabla 2	Resultados de la segunda prueba preliminar.....108
Tabla 3	Datos petrofísicos y características de fluidos contenidos en los núcleos.....113
Tabla 4	Permeabilidad de los núcleos.....114
Tabla 5	Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo removido utilizando los equipos de la ESPOL.....117
Tabla 6	Comparación del peso de los núcleos durante las pruebas preliminares.....121

INTRODUCCIÓN

La posibilidad de realizar el lavado de núcleos de manera simultánea y en importantes cantidades mediante el uso de un equipo denominado “Limpiador de Núcleos con Dióxido de Carbono”, puso en evidencia la inexistencia de la información técnica relacionada con este equipo en los archivos del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL. Las dificultades de conseguir dicha información técnica debido a que se trata de un equipo ensamblado bajo pedido en 1988, dieron origen a la realización de un trabajo enfocado en la rehabilitación, operación y calibración del citado equipo.

La importancia de obtener núcleos (muestras o plugs) limpios, es que a partir de éstos se realizan muchos análisis petrofísicos cuyos resultados son aplicados en análisis de reservorio, por lo tanto, una óptima limpieza de las muestras en importantes cantidades y en el menor tiempo posible, facilitará la obtención de parámetros petrofísicos confiables, que a su vez permitirán realizar análisis de reservorios reales en el corto plazo. Por otro lado, las características que deben tener los núcleos a ser lavados deben ser muy bien entendidas, dado que éstas permitirán realizar el análisis correspondiente para determinar el nivel de limpieza que puede lograrse utilizando este método.

Debido a que el dióxido de carbono es uno de los agentes de limpieza, se debe analizar el cambio que éste sufre a medida que la presión aumenta así como también el papel que cumple en el proceso de lavado, para ello el comportamiento de los gases y sus leyes juegan un papel importante.

La puesta en funcionamiento de este equipo y su correspondiente documentación técnica han requerido de una plena identificación de cada una de sus partes, así como también de sus características y limitaciones. Los ensayos realizados en el laboratorio utilizando el limpiador de núcleos con CO₂, han permitido la elaboración detallada de un procedimiento de operación que garantiza el manejo seguro y apropiado del equipo a altas presiones.

Finalmente, gracias a la colaboración y donación de núcleos por parte del Laboratorio de Investigaciones Geológicas Quito de Petroproducción, fue posible la realización de la limpieza de núcleos saturados con fluidos originales del yacimiento petrolífero del cual fueron extraídos, lo que permitió enmarcar en un contexto real el nivel de limpieza que puede lograrse utilizando el limpiador de núcleos con dióxido de carbono de la ESPOL.

CAPITULO 1

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Descripción general del equipo

El limpiador de núcleos con dióxido de carbono es un equipo que fue diseñado por el Ing. Mihai Vasilache, ex colaborador de la Texas Tech University. Este equipo cuyo nombre en el idioma inglés es “Carbon Dioxide Solvent Flush Equipment”, fue adquirido por la ESPOL en 1988 para dar un mejor equipamiento al Laboratorio de Petróleos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra.

En los archivos del laboratorio de petróleos no ha existido registro alguno que indique acerca del uso que se le haya dado al limpiador de núcleos con CO₂, y más bien se constató la inexistencia de la información técnica relacionada con la operación de este equipo, motivo por el cuál hasta la realización de este trabajo ha permanecido fuera de uso.

El limpiador de núcleos con CO₂ es un equipo diseñado para limpiar (lavar) simultáneamente varios núcleos (muestras o plugs) extraídos de yacimientos petrolíferos saturados con fluidos de reservorio, el proceso de limpieza aplicado en este sistema implica el uso de una mezcla de dióxido de carbono con tolueno, para que ambos fluidos puedan mezclarse deben ser sometidos a la presión de condensación del dióxido de carbono que a temperatura y presión atmosférica se encuentra en estado gaseoso, el dióxido de carbono en estado líquido es un solvente eficaz cuya configuración molecular hace posible su mezcla con tolueno, esta mezcla con la que se lavan los núcleos da como resultado un solvente muy efectivo, que sumado a la alta presión a la que debe mantenerse la mezcla es capaz de ingresar en los poros de la roca y disminuir la viscosidad del petróleo contenido en ella.

Para determinar que los núcleos han sido lavados luego de varias horas en remojo sumergidos en la mezcla, el fluido de desecho debe ser claro, si éste se encuentra negro es necesario un segundo proceso de lavado y así sucesivamente hasta obtener un fluido de desecho relativamente limpio.

Este equipo ha sido ensamblado con partes de diferentes fabricantes, por lo que a más de la información proporcionada por el diseñador del equipo, la información técnica disponible de las partes que lo conforman juegan un papel importante en el entendimiento de su funcionamiento.

1.2. Situación técnica encontrada del equipo y objetivos del tema

En el inicio de este trabajo, el equipo fue encontrado en el Laboratorio de Petróleos de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la ESPOL fuera de operación y sin información documentada sobre aspectos relacionados con el diseño, operación y datos técnicos que sirvan de guía, tampoco se encontró registro alguno que indicara que el equipo haya sido utilizado desde la época en que fue adquirido, la única información disponible se limitaba a una fotografía antigua (Fig.1.1) encontrada en los archivos del Laboratorio de Petróleos en donde se muestra el equipo completamente ensamblado. Debido a la falta de uso del equipo, mecánicamente sus partes requerían del mantenimiento apropiado para su óptimo rendimiento a alta presión.

En la figura 1.2 se muestra la cara frontal del equipo previo a los trabajos de restauración, mientras que en la figura 1.3 se evidencia la falta de un accesorio en la tapa de la cámara de alta presión.

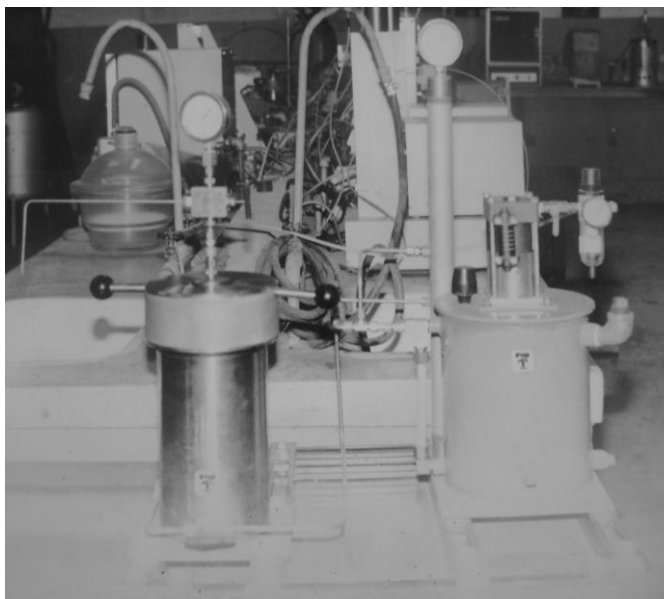


Fig. 1.1 Limpiador de Núcleos 1988
(Fuente: Archivos Laboratorio Petróleos)



Fig. 1.2 Equipo en el inicio del proyecto
(Fuente: Colón López, Abril 2007)



Fig. 1.3 Orificio encontrado en la tapa de la cámara de alta presión

(Fuente: Colón López, Abril 2007)

Objetivo general.- Esta tesis tiene como objetivo general la puesta en funcionamiento del limpiador de núcleos con dióxido de carbono del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL y la elaboración de la correspondiente documentación técnica.

Para lograr este objetivo ha sido fundamental el análisis del diseño, comprensión del funcionamiento y muchas horas de pruebas de laboratorio que han permitido obtener la mayor información posible sobre su capacidad operativa.

Objetivos específicos

- Proporcionar un método alternativo de limpieza de núcleos.
- Aportar con la funcionalidad del limpiador de núcleos con CO₂ para su uso en pruebas de laboratorio.
- Mejorar la preparación de los estudiantes de ingeniería del petróleo en lo concerniente al manejo de este equipo.
- Preparar al estudiante en la observación e interpretación de resultados.

Objetivo secundario.- Este objetivo depende del cumplimiento del objetivo general, puesto que es necesario realizar pruebas que respalden el buen desempeño del equipo, en otras palabras, determinar el porcentaje de limpieza del petróleo en presencia de agua limpiando núcleos saturados con ambos fluidos mediante el uso del limpiador de núcleos con CO₂.

Tradicionalmente el lavado de núcleos ha sido realizado utilizando el extractor soxhlet, de manera que el nivel de limpieza alcanzado con este equipo servirá de referencia para establecer la efectividad del limpiador de núcleos con CO₂.

CAPITULO 2

2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

Para entender el propósito del uso de éste equipo, es necesario conocer acerca de la importancia de contar con núcleos limpios, así como también de los conceptos involucrados en las propiedades petrofísicas de las muestras que serán sometidas a éste proceso de limpieza, también es importante tener presente aspectos físicos generales respecto de los gases debido a que el equipo trabaja con CO₂. Las generalidades concernientes al tolueno también son parte de los conceptos requeridos para el entendimiento del proceso de lavado propiamente dicho.

La importancia de una óptima limpieza de núcleos es el factor que le agrega utilidad a la restauración del equipo, que como una herramienta de laboratorio debe ser utilizada previo al análisis petrofísico de las muestras.

2.1. Limpieza del núcleo y su importancia

Los núcleos o también llamados plugs son muestras pequeñas de roca de distintos tamaños de forma cilíndrica que son analizados para determinar varias propiedades petrofísicas de la roca reservorio, en la industria petrolera estos núcleos provienen de muestras más grandes llamadas testigos que son extraídas de yacimientos con fluidos originales y que en muchos casos en principio son preservadas a la presión y temperatura del pozo para realizar el análisis del contenido de fluidos. En la figura 2.1 se observan varios tubos porta muestras de distintos tamaños (los más grandes de 4" de diámetro por 3 pies de longitud) cargados con testigos de la formación "U". La figura 2.2 muestra la recuperación de un testigo en el laboratorio.



Fig. 2.1 Tubos de aluminio porta muestras
(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)



Fig. 2.2 Tubo de aluminio abierto y testigo aún con fluido de perforación

(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)

La importancia de tener núcleos limpios radica en el hecho de que sobre estos se realizan análisis petrofísicos convencionales y especiales que incluyen:

Análisis convencionales

- Determinación de la porosidad efectiva

- Determinación del volumen de granos
- Determinación del volumen poroso
- Determinación de la densidad de la muestra
- Determinación de la permeabilidad absoluta

Análisis especiales

- Pruebas de desplazamiento
- Cálculo de presiones capilares
- Cálculo de permeabilidades relativas
- Pruebas de compresibilidad y resistencia de la roca
- Pruebas de mojabilidad y movilidad de fluidos
- Propiedades acústicas de la roca
- Propiedades eléctricas de la roca

Estos parámetros son utilizados en diversos cálculos en análisis de reservorios, producción, etc. Para garantizar la autenticidad de éstos parámetros es necesario realizar previamente una limpieza integra de las muestras de tal manera que no queden residuos de los fluidos originales, por esto es fundamental el uso de técnicas apropiadas de limpieza de núcleos sugiriendo para este propósito el uso del limpiador de núcleos con CO₂.

2.2. Porosidad, permeabilidad y saturación como características fundamentales de los núcleos a ser lavados

En la industria petrolera la alta porosidad, permeabilidad y saturación de petróleo de los núcleos extraídos de reservorios, son características básicas que deben tener dichas muestras ya que de esto depende hasta la rentabilidad económica de la explotación de un yacimiento.

Un yacimiento de petróleo es un cuerpo rocoso capaz de almacenar fluidos en los espacios intergranulares llamados poros, cuando estos poros están interconectados permiten que los fluidos almacenados en la roca migren, a esto se conoce como permeabilidad de la roca a los fluidos, por otro lado la saturación de un fluido en una roca porosa y permeable no es más que el porcentaje del espacio poroso de la roca ocupado por un fluido en específico y cuya sumatoria de fracciones o porcentajes debe ser igual a 1 o 100%.

Otro concepto importante es el de la mojabilidad o humectabilidad de la roca, que se define como la tendencia de un fluido a adherirse sobre una superficie sólida en presencia de otros fluidos inmiscibles. La mojabilidad de la roca controla la posición de los fluidos de acuerdo a su habilidad relativa para fluir, la fase mojante debido a su atracción

con la roca y puesto que está alojada en los capilares más pequeños está en una posición desfavorable para fluir, por lo tanto la humectabilidad afecta a la presión capilar y a las permeabilidades.

Finalmente la humectabilidad puede dar origen a que algunos materiales asfálticos se adhieran tan fuertemente que se resistan a su extracción por los procedimientos normales de limpieza de núcleos.

Porosidad.- La porosidad se define como la razón del volumen o espacio vacío de la roca no ocupado por el esqueleto mineral, se la denota generalmente con el símbolo griego Φ , el valor de la porosidad que usualmente es reportado puede ser total o efectivo y puede expresarse como porcentaje o fracción.

La porosidad total o absoluta representa el espacio vacío total del medio, mientras que la porosidad efectiva es la cantidad del espacio vacío que contribuye al flujo de los fluidos, es decir poros interconectados. Esta porosidad es la que se estima regularmente en el laboratorio y es utilizada en cálculos de flujo de fluidos. Su expresión matemática es:

$$\Phi_e = \frac{V_p(\text{efectivo})}{V(\text{total})} \quad 2.1$$

La porosidad efectiva depende de varios factores tales como; El tipo de roca, heterogeneidad del tamaño del grano, empaque de los granos, cementación, tipo y contenido de arcilla, volumen de hidratación, etc. La figura 2.3 muestra el esquema de una roca con porosidad y permeabilidad.

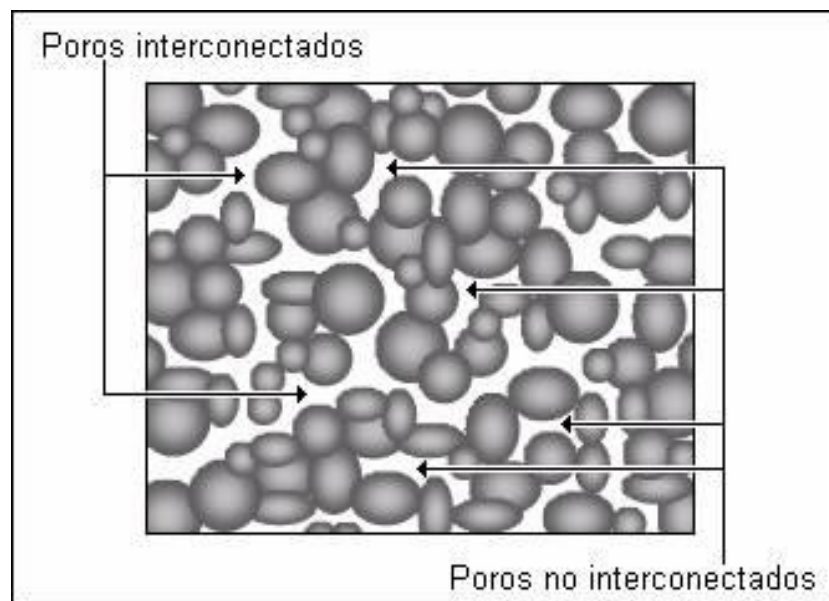


Fig. 2.3 Representación de la porosidad en una roca
(Fuente: Propiedades de la roca yacimiento, Febrero 2008)

La naturaleza de los líquidos que fluyen a través de los poros entre los granos de arena, a menudo determinan cambios en los poros y

en la porosidad, como también lo hace la composición de los granos y su estabilidad química.

Permeabilidad.- Es la capacidad de la roca para permitir la transmisión de fluidos, en otras palabras gracias a la permeabilidad un fluido puede migrar a través del cuerpo de una roca. Para que sea permeable, la roca debe tener poros o fracturas interconectados, por lo tanto hay una relación general entre la porosidad y la permeabilidad (Fig.2.3).

Generalmente, la permeabilidad usada en la industria del petróleo es una constante en la ecuación de Darcy, esta ecuación toma en cuenta la tasa de flujo, gradiente de presión y propiedades de flujo. Una medida directa de la permeabilidad requiere un proceso dinámico de flujo.

Se requiere una medida exacta de la permeabilidad ya que es un parámetro clave que controla estrategias de completación de pozos, producción de fluidos y manejo de reservorios. La permeabilidad es un parámetro estrechamente vinculado al flujo de fluidos en medios porosos descrito por la ecuación establecida por Henry Darcy en base a resultados experimentales. La ley de Darcy es aplicada al flujo

de fluidos en yacimientos que describen el movimiento del petróleo, agua y gas a través del reservorio. De manera general, la ecuación de Darcy es una relación entre la tasa de descarga a través de un medio poroso, la viscosidad del fluido y la caída de presión a lo largo de una distancia dada, a continuación en la figura 2.4 se muestra un esquema representativo del experimento de Darcy.

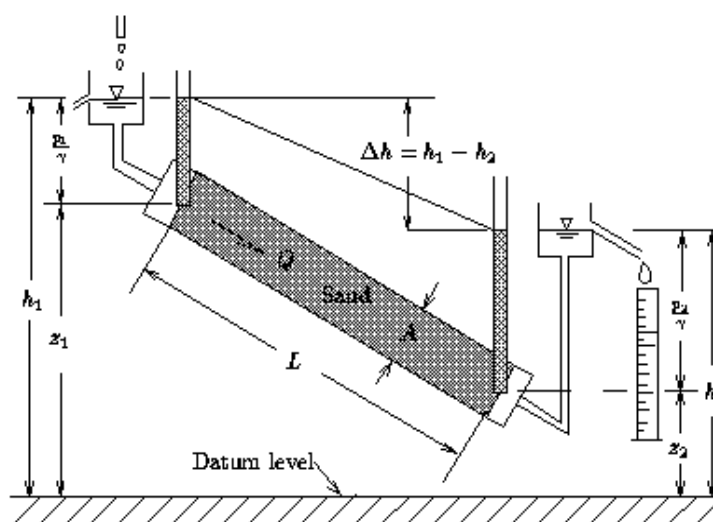


Fig. 2.4 Experimento de Darcy para determinar la permeabilidad
(Fuente: Profesor Jacob Bear, Octubre 2007)

$$Q = -0.001127 \frac{kA}{\mu} \left[\frac{dP}{dL} - 0.433 \gamma' \cos \alpha \right] \quad 2.2$$

Q= Tasa de flujo, (Bbls/día)

K_{abs}= permeabilidad, (md)

A= Area, (ft²)

μ = Viscosidad del fluido, (cp)

P= presión, (psia)

L= Distancia recorrida por el flujo, (ft)

γ' = Gravedad específica del fluido (relativa al agua)

α = Angulo medido con respecto a la vertical en el sentido del flujo

El signo negativo delante de la constante 0.001127 es necesario porque el fluido fluye desde una alta presión a una baja presión en el sentido de L, por lo que la pendiente representada por el gradiente de presión es negativa, con esto se garantiza que la expresión sea positiva.

La permeabilidad se ha establecido de tres maneras ampliamente aceptadas, y estas son: Permeabilidad absoluta, permeabilidad efectiva y permeabilidad relativa.

Permeabilidad absoluta.- Por definición, la permeabilidad absoluta de un material poroso dado es la habilidad que tiene un fluido de pasar a través de poros interconectados o de redes de fracturas cuyo fluido que satura la roca ocupa el 100% de la porosidad efectiva.

Permeabilidad efectiva.- Permeabilidad que la roca ofrece al paso de un fluido cuando la roca está saturada parcialmente con ese fluido.

Permeabilidad relativa.- Es la relación de la permeabilidad efectiva con respecto a algún valor base, generalmente se utilizan tres tipos de permeabilidad base: La permeabilidad absoluta al aire, la permeabilidad absoluta al agua y la permeabilidad al aceite a la saturación de agua congénita del yacimiento. Las características de permeabilidad relativa son una medida directa de la capacidad de un sistema poroso para conducir un fluido en presencia de otros inmiscibles. La permeabilidad relativa es el factor más importante en lo que respecta al movimiento de las fases inmiscibles (petróleo, agua y gas) dentro del medio poroso y depende de variables tales como:

- Geometría del sistema poroso
- Mineralogía de la roca
- Permeabilidad absoluta y porosidad
- Preferencia de mojabilidad de la roca
- Viscosidad de los fluidos
- Tensión interfacial

- Tasas de desplazamiento
- Presion del reservorio
- Presencia de fases inmóviles o atrapadas

Saturación.- Es la razón del volumen que un fluido ocupa con respecto al volumen poroso. Explicándolo de otra manera, consideremos un volumen representativo del reservorio, con los poros llenos de petróleo, agua y gas, en términos volumétricos podemos expresarlo como:

$$V_p = V_o + V_w + V_g \quad 2.3$$

En base a esto y considerando el concepto inicial de saturación, esta se define como:

$$S = \frac{V_{fluido}}{V_p} \quad 2.4$$

El fluido, en este caso puede ser petróleo, agua o gas, así en el caso del petróleo la saturación de petróleo "So" sería:

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} \quad 2.5$$

La saturación puede ser expresada como una fracción o porcentaje, la saturación de todos los fluidos presentes en un medio poroso debe sumar 1 o 100%. Este parámetro cambia tanto en el espacio como en el tiempo, el reservorio puede tener diferentes niveles de saturación que cambian progresivamente de acuerdo al avance de la producción de fluidos.

La saturación de fluidos de una roca puede variar desde el 100% hasta valores pequeños pero nunca hasta cero, siempre queda una cantidad capilar de fluidos que no puede ser desplazada, a esto se conoce como la saturación residual de fluidos.

2.3. Influencia de la presión capilar y fluidos irreductibles en la limpieza de los núcleos

Presión capilar.- En los reservorios existen fases de fluidos inmiscibles cuyas fuerzas que los mantienen en equilibrio entre si y con la roca son manifestaciones de fuerzas capilares. En un sistema de conductos capilares similares a los existentes en las rocas reservorios y en ellos la presencia de fluidos inmiscibles se generan

tensiones superficiales entre fases, además las curvaturas debidas a los conductos capilares tortuosos hacen que dos fases experimenten diferentes presiones. A medida que las saturaciones relativas de las fases cambian, las diferencias de presión también cambian. La diferencia entre las presiones de dos fases cualesquiera se define como presión capilar. Las presiones capilares se pueden determinar para sistemas bifásicos de diferentes clases. De interés para la industria del petróleo están los sistemas de gas – agua, petróleo – gas y agua – petróleo.

La influencia de la presión capilar en el proceso de lavado se manifiesta sobre pequeñas cantidades de fluidos. Durante la limpieza se remueve la mayor cantidad del petróleo (y agua durante el secado) que satura los núcleos, lo cual deriva en un paulatino cambio entre las tensiones superficiales de los fluidos, este cambio en la tensión superficial es mayor al secar los núcleos que han sido lavados puesto que el tolueno que los satura empieza a evaporarse inmediatamente, si los núcleos son secados en el horno de vacío, hasta el agua contenida en los conductos más pequeños se evapora sin que esto signifique que se alcance una saturación de agua igual a cero, a medida que la saturación de los fluidos disminuye la presión capilar se manifestará con mayor fuerza.

Fluidos irreductibles.- Se manifiestan generalmente como saturaciones de agua irreductible y agua connata.

Saturación de agua irreductible (S_{wirr}).- Se define como la máxima saturación de agua que permanece como fase discontinua en el medio poroso (fig.2.5). La discontinuidad son regiones con agua separadas por zonas sin agua, es decir que están aisladas, de tal manera que a las condiciones necesarias el agua no puede fluir por el sistema cuando se aplican diferencias de presión.

Saturación de agua connata (S_{wc}).- El agua connata conocida también como agua intersticial, es el agua atrapada en los poros o intersticios de una formación en el momento de su depósito o creación. La saturación de agua connata es la saturación de agua inicial en cualquier punto del reservorio (fig.2.5). La saturación de agua connata alcanza un valor de saturación de agua irreductible solo sobre la zona de transición, en la zona de transición el agua es móvil.

El agua y el petróleo que existe en las muestras, luego de varias pruebas de lavado y secado en el laboratorio, se ha determinado que

siempre habrá un pequeño porcentaje de estos fluidos que no es posible limpiar debido a su alojamiento en los poros más pequeños y a su adherencia a los granos de las rocas (comúnmente mojabilidad hidrófila). Tanto el extractor soxhlet como el limpiador de núcleos con CO_2 son capaces de limpiar el petróleo de los núcleos en un alto porcentaje, mientras que el agua se evapora en gran medida al secar los núcleos en el horno de vacío, a pesar de esto siempre existirán pequeñas cantidades de fluidos irreductibles.

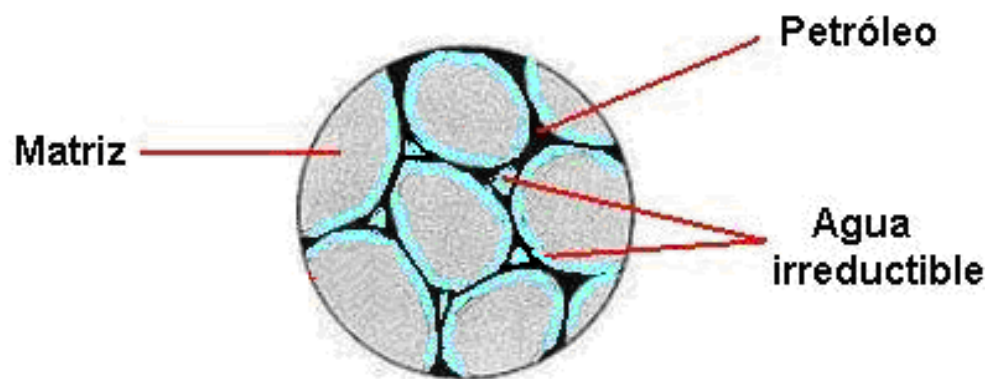


Fig. 2.5 Distribución de los fluidos en la roca

(Fuente: Frank H. Diciembre 2007)

2.4. Aspectos básicos teóricos de los gases y la importancia del CO_2 en el proceso de lavado de núcleos

Una reseña teórica respecto de los gases y sus leyes físicas básicas son importantes debido a que uno de los agentes de limpieza utilizados es el gas CO_2 .

Se denomina gas al estado de la materia que no tiene forma ni volumen propio, su principal composición son moléculas no unidas, expandidas y con poca fuerza de atracción, haciendo que no tengan forma ni volumen definido lo que provoca que éste se expanda para ocupar todo el volumen del recipiente que lo contiene.

En lo concerniente a los gases existen cuatro cantidades medibles que son de gran interés: presión, volumen, temperatura y masa de la muestra del material. Cualquier gas se considera como un fluido porque tiene las propiedades que le permiten comportarse como tal.

Sus moléculas en continuo movimiento logran colisionar las paredes que lo contienen y casi todo el tiempo ejercen una presión permanente. Como el gas se expande, la energía intermolecular hace que un gas al ir añadiéndole energía calorífica tienda a aumentar su volumen. Un gas tiende a ser activo químicamente debido a que su superficie molecular es también grande, es decir entre cada partícula se realiza mayor contacto haciendo mas fácil una o varias reacciones entre las sustancias. Para entender mejor el comportamiento de un gas siempre se realizan estudios con respecto al gas ideal aunque este en realidad nunca existe, las propiedades de este son:

- Un gas ideal esta constituido por moléculas de igual tamaño y masa, pero no de una mezcla de gases diferentes.
- Se le supone con un número pequeño de moléculas, así su densidad es baja y su atracción molecular es nula.
- El volumen que ocupa el gas es mínimo, en comparación con el volumen total del recipiente
- Las moléculas de un gas contenido en un recipiente, se encuentran en constante movimiento, por lo que chocan entre si o contra las paredes del recipiente que las contiene.

En resumen un gas no tiene forma ni volumen fijo, se caracteriza por la casi nula cohesión y la gran energía cinética de sus moléculas, las cuales se mueven constantemente.

Las leyes de los gases.- Existen diversas leyes que relacionan la presión, el volumen y la temperatura de un gas. Estas leyes son: La ley de Boyle-Mariotte, la ley de Charles y la ley de Gay-Lussac, entre las más importantes.

Ley de Boyle-Mariotte.- Cuando el volumen y la presión de una cierta cantidad de gas es mantenida a temperatura constante, el

volumen será inversamente proporcional a la presión $PV=K$, donde K es constante si la temperatura y la masa del gas permanecen constantes.

Cuando aumenta la presión, el volumen disminuye; si la presión disminuye, el volumen aumenta. El valor exacto de la constante K no es necesario conocerlo para poder hacer uso de la ley, si consideramos las dos situaciones, manteniendo constante la cantidad de gas y la temperatura, deberá cumplirse la relación.

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad 2.6$$

Ley de Charles.- A una presión dada, el volumen ocupado por un gas es directamente proporcional a su temperatura. Matemáticamente la expresión es:

$$V_1/T_1 = V_2/T_2 \quad 2.7$$

Por lo tanto el volumen disminuye al disminuir la temperatura.

Ley de Gay-Lussac.- La presión de un gas que se mantiene a volumen constante, es directamente proporcional a la temperatura.

$$P_1 / P_2 = T_1 / T_2 \quad 2.8$$

Ley de los gases ideales.- Las tres leyes mencionadas pueden combinarse matemáticamente en la llamada ley general de los gases.

Su expresión matemática es:

$$PV = nRT \quad 2.9$$

Siendo P la presión, V el volumen, n el numero de moles ($n=1$) y R la constante universal de los gases ideales.

El valor de R depende de las unidades que se estén utilizando:

- $R = 0.082 \text{ atm l / K mol}$, si se trabaja con atmósferas y litros.
- $R = 8.31451 \text{ KJ / K mol}$, si se trabaja en Sistema Internacional de Unidades.

Gases reales.- El comportamiento de un gas suele concordar mas con el comportamiento ideal cuanto mas sencilla sea su formula química y cuanto menor sea su reactividad o tendencia a formar enlaces. Así por ejemplo, los gases nobles al ser monoatómicos y tener baja reactividad, sobre todo el helio, tendrán un

comportamiento bastante cercano al ideal. Les seguirán los gases diatomicos, en particular el más liviano, hidrógeno. Menos ideales serán los triatómicos como el dióxido de carbono, el caso del vapor de agua aun es peor ya que la molécula al ser polar tiende a establecer puentes de hidrogeno lo que aun reduce mas la idealidad.

Para que la ecuación de los gases ideales describa el comportamiento de los gases reales es necesario el uso de un factor de ajuste conocido como factor de compresibilidad, este factor denotado con la letra “z” corresponde al valor de la unidad en el caso de los gases ideales, así pues, la ecuación de los gases reales sería:

$$PV = znRT \quad 2.10$$

Una de las formas más comunes de obtener el valor aproximado de z es a través del cálculo de la temperatura y presión reducidas en función de sus valores críticos respectivamente.

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad 2.11$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad 2.12$$

$$V_r = \frac{V}{V_c} \quad 2.13$$

Los gases reales en el mismo estado de volumen y temperatura reducida ejercen aproximadamente la misma presión. En otras palabras, los gases reales en el mismo estado reducido de presión y temperatura tienen aproximadamente el mismo factor de compresibilidad. Esta característica es aprovechada para calcular el factor de compresibilidad y otros parámetros PVT de los gases reales. En la figura 2.6 se observa el comportamiento similar de diferentes gases a diferentes temperaturas reducidas.

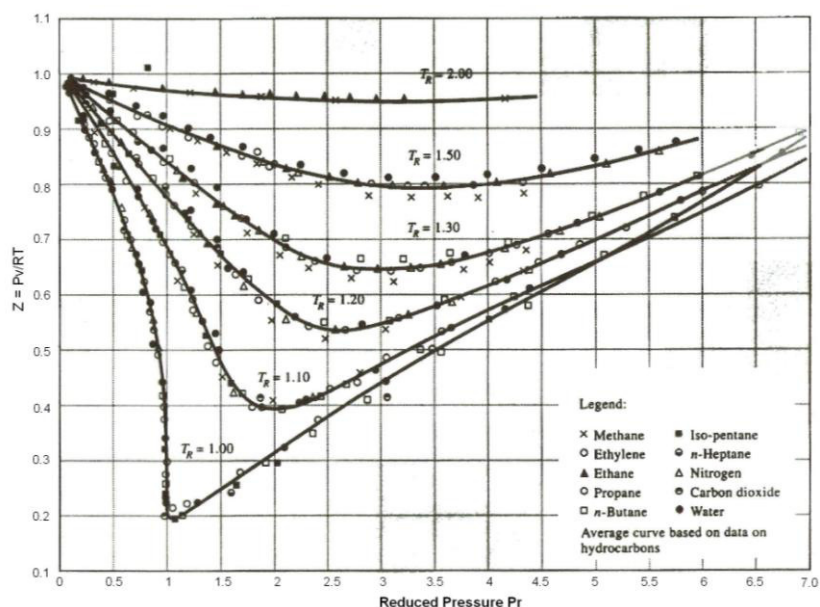


Fig. 2.6 Presión reducida vs. Factor de compresibilidad
(Fuente: The critical point, Octubre 2007)

Estas cartas son generalmente llamadas “Cartas del factor de compresibilidad generalizado”, se utilizan para obtener el valor de z una vez conocida la presión y temperatura reducidas. Existen diferentes tipos de cartas que dependen del rango de presión y temperatura que se requiere. En el anexo A se muestra la carta del factor de compresibilidad generalizado para bajas presiones reducidas.

Generalidades teóricas del CO_2 y su importancia en el lavado de núcleos.- El dióxido de carbono (CO_2) también denominado anhídrido carbónico es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono, además es un gas incoloro, denso y poco reactivo con la mayor parte de las sustancias, no es combustible. En forma de gas o como sólido finamente dividido se lo llama nieve o hielo seco. El CO_2 no deja residuos al evaporarse, de manera que elimina la necesidad de limpieza del agente. Aunque el dióxido de carbono tiene enlaces polares, es una molécula no polar ya que los dipolos se anulan mutuamente tal como lo muestra la figura 2.7.

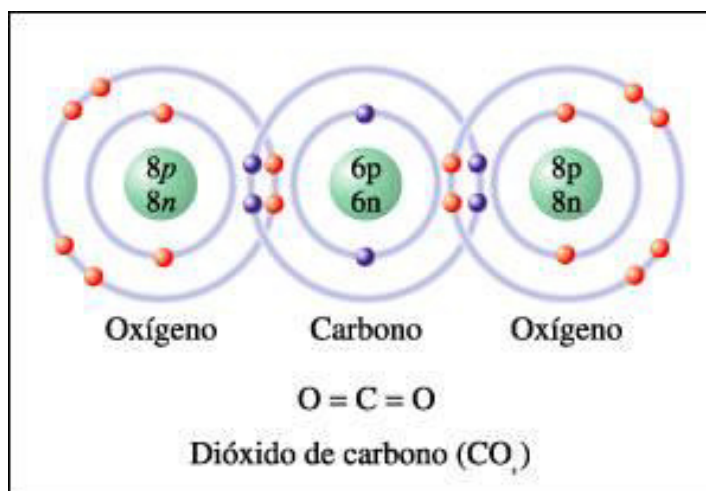


Fig. 2.7 Enlaces del CO_2

(Fuente: Átomos y moléculas, Agosto 2007)

Debido a esta naturaleza no polar, el dióxido de carbono en estado líquido se disuelve con facilidad en fluidos con moléculas no polares como hidrocarburos con menos de 20 átomos de carbono y otras moléculas orgánicas como aldehídos, éteres y acetonas. El CO_2 contribuye a la disminución de la viscosidad de los crudos pesados, sin embargo, mediante el empleo de un solvente, se puede aumentar la solubilidad del CO_2 en estos crudos y en muchas otras sustancias. Este hecho respalda el uso del CO_2 como un importante agente de limpieza mezclado con tolueno.

El CO_2 es un gas que tiene los tres estados de la materia, sólido, líquido y gas. Este gas también tiene un punto triple sólido, líquido y vapor, es decir que bajo las condiciones apropiadas pueden coexistir

los tres estados de la materia al mismo tiempo. El diagrama de fases del CO₂ en la figura 2.8 denota algunos parámetros de interés.

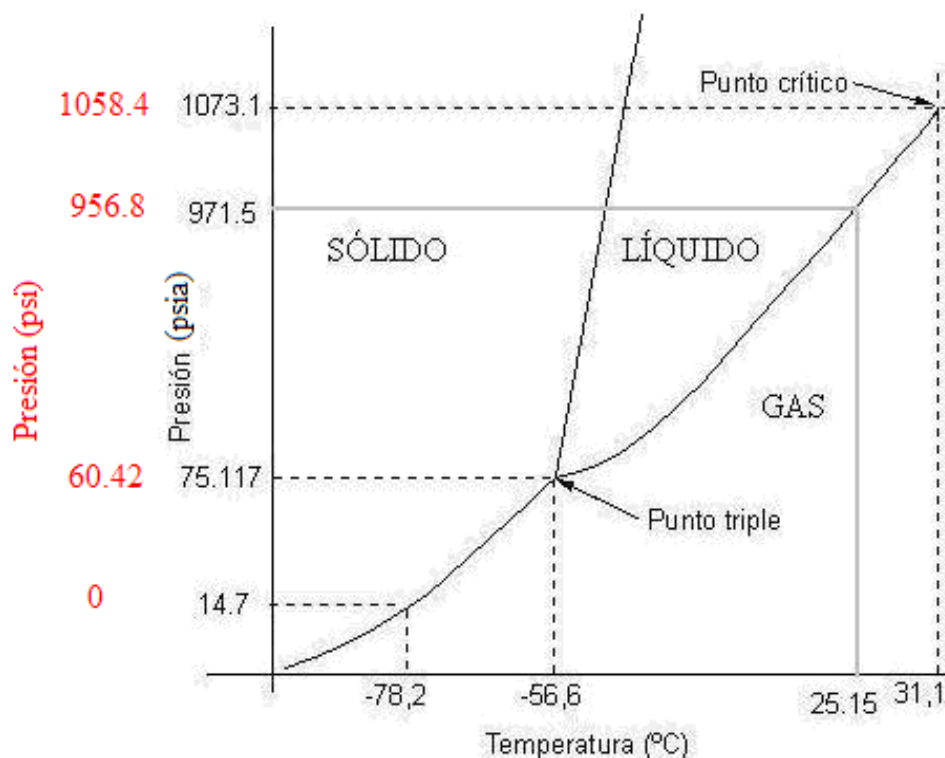


Fig. 2.8 Diagrama de fases del CO₂
(Fuente: Recursos en red, Agosto 2007)

En este diagrama en abscisas aparece la temperatura y en ordenadas la presión. Las líneas representan estados de equilibrio entre las fases. En las zonas limitadas por estas líneas solo es posible de forma estable la existencia de una única fase. El punto triple, intersección de las tres líneas de equilibrio corresponde a las condiciones de presión y temperatura en que las tres fases se

encuentran en equilibrio, es decir que pueden coexistir. El CO_2 a presión elevada y temperatura constante puede condensarse. La temperatura crítica del gas es de $31.1\text{ }^\circ\text{C}$ de modo que por encima de esta temperatura es imposible condensarlo, en otras palabras la temperatura crítica representa la temperatura máxima a la cual un elemento permanece en estado líquido, y la presión crítica es la presión medida a esta temperatura. Las propiedades físicas de este gas se detallan en el anexo B.

Si el punto crítico se encuentra a $31.1\text{ }^\circ\text{C}$ como lo indica la figura 2.8, significa que por debajo de esa temperatura y por encima de 75.117 psia podemos tener CO_2 líquido, una explicación de lo que sucede en las botellas es que tenemos el CO_2 a una presión superior a 75.117 psia , lo cual se puede comprobar en el manómetro que indica la presión en la botella puesto sobre ella. Al abrir la botella la presión del gas disminuye y lo que sale por la boca es CO_2 en estado gaseoso, la expansión adiabática de este gas produce un descenso de temperatura produciendo la congelación del gas a estado sólido, es decir que al enfriarse únicamente puede convertirse en sólido sin pasar por líquido.

En resumen, la presión de condensación del CO₂ a la temperatura del Laboratorio de Petróleos que oscila los 27 °C está entre 956.8 y 1058.4 psi, lo cual sustenta la sugerencia del diseñador del equipo al manifestar que la presión permanezca por encima de 1000 psi con el objetivo de mantener al CO₂ en estado líquido y facilitar su mezcla con tolueno en la cámara de alta presión.

Resumen de riesgos y precauciones al utilizar y manipular CO₂:

- Asfixiante a altas concentraciones
- Conservar el recipiente con CO₂ en un lugar bien ventilado
- No respirar los gases
- El contacto con el CO₂ líquido puede causar quemaduras por frío o congelación
- Se recomienda no arrastrar, deslizar o rodar los cilindros, utilizar una carretilla para moverlos
- No calentar los cilindros de ningún modo para aumentar la descarga del producto

2.5. El tolueno como agente de limpieza

El tolueno es un líquido incoloro con un olor característico parecido a los disolventes de pintura, ocurre en forma natural en el petróleo crudo y en el árbol Tolú. Su nombre deriva del bálsamo del árbol

“Miroxylon balsamum (bálsamo Tolú o bálsamo de Colombia)” del cual Henri Etienne Sainte-Claire Deville lo obtuvo por primera vez en 1844 mediante destilación seca.

El tolueno o metilbenceno (C_7H_8) es miscible en la mayoría de solventes orgánicos no polares, pero casi inmisible en el agua (0.52 g/l). Es la materia prima a partir de la cual se obtienen derivados del benceno, el ácido benzoico, el fenol, la caprolactama, la sacarina, medicamentos, colorantes, perfumes, TNT y detergentes. También se produce durante la manufactura de la gasolina y de otros combustibles a partir del petróleo crudo y en la manufactura del coque a partir del carbón. El tolueno se usa en la fabricación de pinturas, diluyentes de pinturas, barniz para las uñas, lacas, adhesivos y gomas, también suele estar presente en el humo de los cigarrillos y en ciertos procesos de imprenta y curtido de cuero. Las propiedades físico químicas del tolueno se sintetizan en el cuadro del anexo C.

Debido a las dificultades que tiene el CO_2 para disolverse en ciertos aceites pesados de manera efectiva, se recomienda su mezcla con un solvente que permita aumentar la capacidad del CO_2 para disminuir la viscosidad de estos crudos, en este caso el solvente

recomendado por el diseñador del limpiador de núcleos es el tolueno debido a su alta volatilidad y ausencia de residuos al evaporarse. Esta recomendación por supuesto no impide el uso de otros solventes que puedan brindar resultados similares a los obtenidos con tolueno. El uso de solventes alternativos dependerá principalmente de cuatro factores importantes como son: Efectividad, costo, disponibilidad y facilidades de manipulación.

El tolueno y el CO₂ en su estado líquido son fluidos no polares, por lo que la mezcla de ambos crea un solvente capaz de disminuir la viscosidad del petróleo al punto de disolverlo luego de varias horas en remojo a alta presión.

Resumen de riesgos y precauciones al manipular tolueno:

- El tolueno puede afectar al inhalar y al pasar a través de la piel
- El tolueno debe manipularse como una sustancia que muy posiblemente cause daño al feto en desarrollo
- El contacto puede irritar la piel y los ojos
- Respirar el tolueno puede irritar la nariz, la garganta, causar tos y respiración con silbido.
- La exposición al tolueno puede afectar al sistema nervioso y causar dificultades de concentración, dolores de cabeza y

reflejos más lentos. A niveles más altos puede causar sensación de desmayo y mareo. Puede ocurrir la muerte

- El contacto prolongado puede secar la piel y causar salpullido
- La exposición repetida al tolueno puede causar daño hepático, renal y cerebral
- El tolueno es un líquido inflamable y presenta peligro de incendio

CAPITULO 3

3. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO

Durante el desarrollo de este capítulo se describirán las características técnicas, así como también ciertos detalles del trabajo de restauración que fue necesario darle al equipo con el fin de ponerlo en funcionamiento. Durante las labores de limpieza y restauración fue posible notar algunos de los trabajos de mantenimiento al que debe someterse este equipo con el fin de prevenir su deterioro sobre todo en las partes más sensibles.

3.1. Especificaciones técnicas del equipo y sus partes

El equipo ha sido ensamblado con diferentes partes, cada una con una presión distinta de trabajo, por lo que todo el sistema tiene como presión máxima aquella que en comparación con las demás resulta en la de menor valor, en este caso la presión máxima de trabajo del limpiador de núcleos con CO₂ es de 2500 psi, que corresponde a la presión máxima de trabajo de la cámara de alta presión. La figura

3.1 muestra el equipo con sus partes y accesorios debidamente identificados.

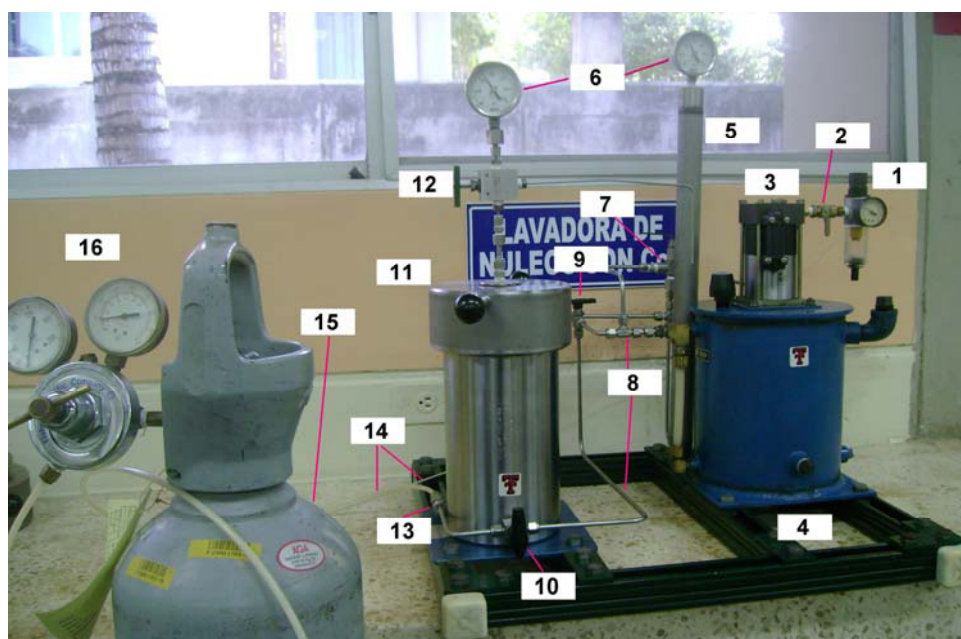


Fig. 3.1 Partes del equipo

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

1. Regulador de presión neumática con filtro
2. Válvula de paso del aire
3. Bomba hidráulica
4. Tanque de deposito del tolueno
5. Pulsation dampener
6. Medidores de presión
7. Válvula de recirculación
8. Líneas de flujo hidráulicas

9. Válvula de tres vías de líneas de flujo
10. Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
11. Cámara de alta presión
12. Válvula de alivio
13. Válvula check (Ingreso del CO₂)
14. Líneas de flujo de gases (CO₂ y aire)
15. Bombona de CO₂
16. Regulador de presión del tanque de CO₂

3.1.1 Cámara de alta presión

La cámara de alta presión es un compartimiento cilíndrico de acero inoxidable con un orificio de drenaje en su parte inferior lateral, consta de una tapa roscable del mismo material sobre la que se encuentra una válvula de alivio y un medidor de presión.

Este compartimiento tiene una presión máxima de trabajo de 2500 psi, el acero que conforma el cuerpo del cilindro tiene un espesor de 0.917 cm, la tapa tiene un espesor de 1.73 cm, dentro de la tapa se encuentra alojado un disco de acero de 12.5 cm de diámetro que sella la salida de fluido por los bordes del cilindro de la cámara, la capacidad volumétrica de la cámara es de 3.60 litros (0.95 galones).

La cámara de alta presión es donde las muestras a ser lavadas se depositan envueltas en una malla de nylon que evita que las muestras golpeen las paredes del cilindro durante el proceso de lavado, además la maya facilita su extracción puesto que se trata de un paquete compacto, la presión a la que se deben someter las muestras en la cámara durante el tiempo de remojo debe ser de 1050 psi como mínimo y 1200 psi como máximo.

Tareas de limpieza y acondicionamiento.- La tapa de la cámara (fig.3.2) fue encontrada incompleta ya que presentaba un orificio de 5.5 cm de diámetro en la parte superior sin el accesorio correspondiente que lo cubra.



Fig. 3.2 Vista en planta de la cámara de alta presión
(Fuente: Colón López, Junio 2007)

En el orificio de la tapa se instaló una placa de acero de acuerdo a la antigua fotografía encontrada y a las recomendaciones del director de este proyecto de tesis, la placa de acero cumple con el espesor y la presión de trabajo de la cámara que es de 2500 psi, además permite la instalación de una válvula y un manómetro en la parte superior.



Fig. 3.3 Accesorios de la tapa de la cámara de alta presión
(Fuente: Colón López, Agosto 2007)

3.1.2 Bomba de alta presión

Para que el sistema alcance la presión requerida es necesario el uso de una bomba, en el caso de este equipo se trata de una bomba hidráulica de desplazamiento positivo marca "Haskel" modelo MCP-36 accionada con aire comprimido.

La figura 3.4 muestra la bomba hidráulica, mientras que la figura 3.5 muestra los puertos de entrada y salida del aire y líquido respectivamente, así como también las dimensiones externas de la bomba.



Fig. 3.4 Bomba hidráulica MCP-36 de acción neumática
(Fuente: haskel.com, Septiembre 2007)

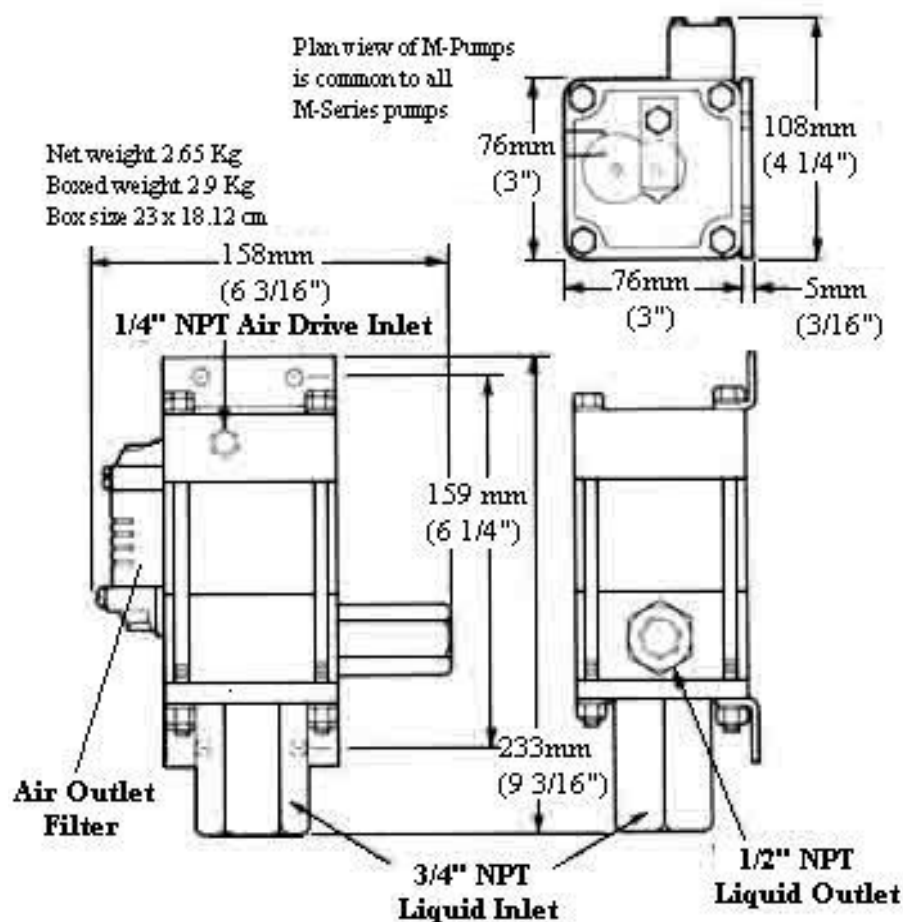


Fig. 3.5 Diagrama externo de la bomba

(Fuente: haskel.com, Septiembre 2007)

La bomba tiene un ensamblaje sencillo y esta dividida en dos secciones, la sección neumática y la sección hidráulica tal como se muestra en el esquema de la figura 3.6. Básicamente, una bomba hidráulica de acción neumática tiene un pistón en su interior, el cuál en un extremo es empujado por una presión de aire dada, mientras en el otro extremo, el pistón empuja el líquido a ser desplazado, el área del pistón de la sección de

aire es considerablemente mayor al área de la sección hidráulica, esto permite que a bajas presiones neumáticas se alcancen altas presiones hidráulicas. El aire y el líquido no entran en contacto.

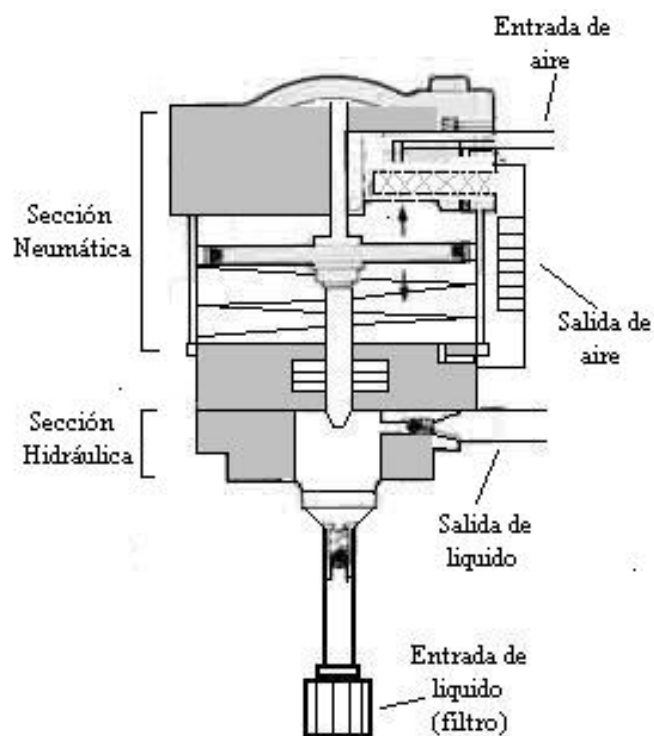


Fig. 3.6 Esquema interno de la bomba hidráulica

(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

La presión hidráulica máxima que puede alcanzar este modelo es de 4500 psi a una presión de alimentación de aire comprimido de 125 psi como máximo. La bomba se encuentra montada sobre el tanque en el que se carga el tolueno desde

donde éste es succionado y luego expulsado hacia la cámara de alta presión a través de las líneas de flujo hidráulicas, este tanque tiene una capacidad de 8 litros (2.11 galones), el proceso de presurización de la cámara se produce de manera gradual a medida que la bomba la inunda con el tolueno. Para variar la presión de desplazamiento del tolueno es necesario variar la presión de entrada del aire comprimido, esta transformación de la energía neumática en energía hidráulica se produce debido a un sencillo pero eficaz principio de funcionamiento.

Principio de funcionamiento.- La bomba hidráulica de acción neumática funciona en base a un principio de diferencial de áreas. Sobre el área más grande del pistón en el interior de la bomba, se ejerce una presión debido al ingreso del aire comprimido, mientras que en el otro extremo del pistón se encuentra un área mucho menor que es la que ejerce la presión sobre el líquido a ser desplazado.

Según las especificaciones técnicas del fabricante de la bomba hidráulica Haskel, la razón nominal entre el área del pistón de aire y el pistón hidráulico está indicado por el número del

modelo de la bomba, es decir que la razón nominal en este caso es 36, por lo tanto la presión hidráulica que puede alcanzar este modelo es calculado tal como indica el fabricante de la siguiente manera; $36 \times 125 = 4500$, donde 125 psi es la presión máxima de entrada del aire comprimido, y el resultado 4500 psi es la presión hidráulica de salida. La presión anteriormente calculada se aproxima mucho a la presión máxima que la bomba es capaz de generar, esto se debe a que la razón de área real es un 15% mayor que la razón nominal, es decir que el diferencial de área real es 41.4, por lo tanto realizando el mismo cálculo con el diferencial de área real, la presión máxima que es capaz de generar y a la que se detiene el bombeo es de 5175 psi aproximadamente, es importante mencionar que la presión de paro de la bomba está influenciada también por la fricción de las partes móviles del interior de la bomba por lo que estos valores son considerados estrictamente una referencia teórica.

Para que la bomba se detenga automáticamente debe ocurrir un equilibrio entre las fuerzas ejercidas sobre el pistón de la sección de aire y el pistón de la sección hidráulica, si decimos que:

$$P = \frac{F}{A} ; \text{Formula general, donde} \quad 3.1$$

P: presión

F: fuerza

A: área

Si existe equilibrio de fuerzas en las secciones neumática e hidráulica, entonces

$$P1 = \frac{F}{A1} \quad \text{y} \quad P2 = \frac{F}{A2}, \text{ donde}$$

A1: Área del pistón de la sección de aire

A2: Área del pistón de la sección hidráulica

P1: Presión en la sección de aire

P2: Presión en la sección hidráulica

F: Fuerza ejercida sobre las áreas del pistón

Igualando se tiene

$$P1 * A1 = P2 * A2 \quad 3.2$$

$$\frac{A1}{A2} = \frac{P2}{P1}$$

$$\frac{A1}{A2} = \frac{5175}{125} = 41.4 ; \text{ Que es el diferencial de \u00e1rea real de la}$$

bomba.

Secci\u00f3n neum\u00e1tica de la bomba.- Contiene en su interior un pist\u00f3n met\u00e1lico de peso ligero con sellos de caucho tipo o-ring colocados en el interior de una camisa cil\u00edndrica de fibra de vidrio, cuando el aire comprimido es alimentado a la secci\u00f3n neum\u00e1tica \u00e9ste empuja el pist\u00f3n hacia abajo para ejecutar la carrera de desplazamiento hasta que la v\u00e1lvula piloto libera el aire, mientras el pist\u00f3n baja el aire del lado inferior del pist\u00f3n de la secci\u00f3n neum\u00e1tica es venteado hacia el exterior a trav\u00e9s de unos orificios en la parte inferior del compartimiento, debido a que el resorte colocado en la parte inferior del pist\u00f3n se comprime en la carrera de desplazamiento \u00e9ste empuja el pist\u00f3n hacia arriba para realizar la carrera de succi\u00f3n y completar el ciclo (fig.3.7).

Para que el ciclo del aire se complete la bomba dispone en la tapa de la camisa de una v\u00e1lvula de ciclo controlada por una v\u00e1lvula piloto, \u00e9sta v\u00e1lvula de ciclo consiste en un carrete de peso ligero que canaliza el aire comprimido hacia adentro o hacia afuera del lado superior del pist\u00f3n dependiendo de la

posición de éste. La presión del aire debido al movimiento del pistón acciona la válvula piloto presurizando y permitiendo el venteo alternadamente para mantener el ciclo de manera automática. La figura 3.7 muestra un esquema con las partes internas que conforman la sección neumática de la bomba.

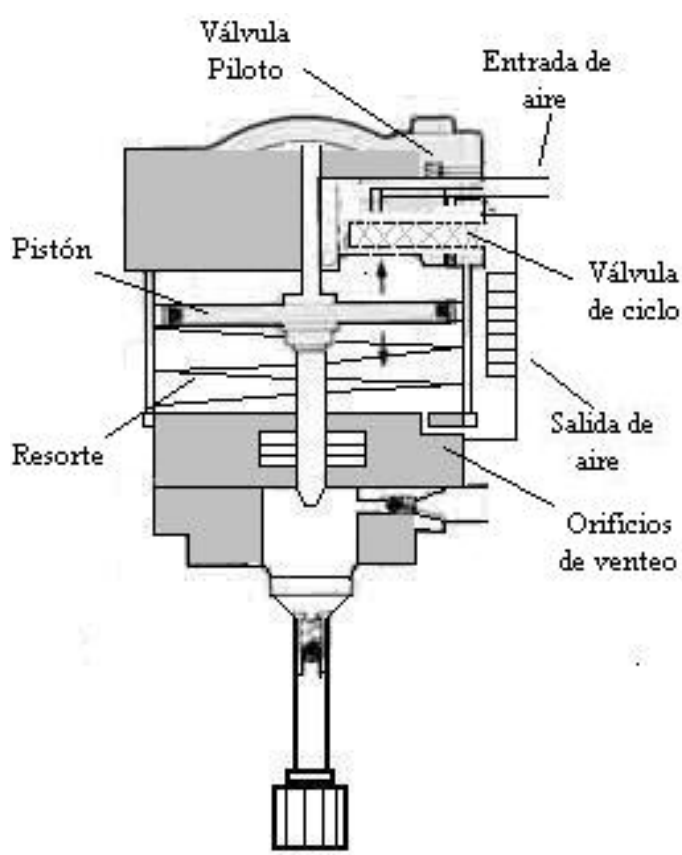


Fig. 3.7 Esquema interno de la sección de aire

(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

Sección hidráulica de la bomba.- El pistón hidráulico está directamente conectado al pistón neumático, se encuentra

debidamente instalado en una camisa, su diámetro determina la razón de bombeo o flujo de salida y la capacidad de presión máxima. Su función es la de succionar líquido dentro del cuerpo hidráulico a través de la válvula check de entrada y forzar su salida a través de la válvula check de salida a una presión más alta (fig.3.8).

Estas válvulas de no retorno de líquido tienen resortes que ayudan a controlar el paso del líquido dentro y fuera de la bomba. Cuando el pistón hidráulico está en la carrera de succión, la válvula check de entrada se abre al máximo, el líquido es succionado dentro de la bomba mientras la válvula check de salida se mantiene cerrada debido a un resorte. En la carrera de desplazamiento la válvula check de entrada se mantiene cerrada a medida que el pistón hidráulico obliga al líquido a salir a través de la válvula check de salida. Sellos dinámicos bordean al pistón hidráulico cuya función es contener el líquido bajo presión durante el ciclo y prevenir lı́quidos externos o lı́quidos dentro de la sección de aire. La figura 3.8 muestra un esquema con las partes internas que conforman la sección hidráulica de la bomba.

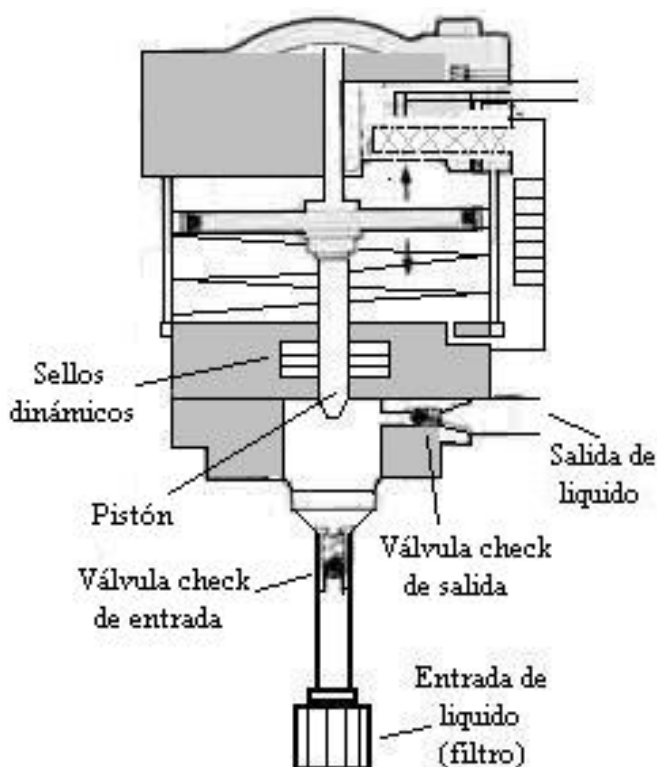


Fig. 3.8 Esquema interno de la sección hidráulica
(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

Chequeo realizado a las partes internas de la bomba.- Para garantizar el funcionamiento adecuado de la bomba fue necesario chequear el estado de sus partes internas, sobre todo para descartar la presencia de óxido y verificar el estado de los o-rings de caucho. El chequeo de la bomba se lo realizó en base al diagrama proporcionado por el fabricante en su página web. En el anexo D se muestra el diagrama y lista de partes completo.

Las piezas internas fueron encontradas en buen estado, requiriendo únicamente de lubricación por lo que no fue necesario realizar cambios importantes. Los accesorios externos tales como el niple del puerto de entrada de aire y el filtro de la succión hidráulica fueron cambiados y limpiados respectivamente.



Fig. 3.9 Filtro de línea de succión de líquido de la bomba
(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

3.1.3 Sistema de medición y líneas de alta presión

Este equipo de lavado de núcleos trabaja con una elevada presión hidráulica, por esta razón se debe conocer acerca del funcionamiento de los instrumentos de medición de la presión utilizados en este equipo para obtener lecturas precisas, todas las presiones registradas son reportadas en base al sistema ingles de medidas, es decir libras por pulgadas cuadradas (Pounds per Square Inches, PSI). Las características generales de las líneas de flujo también deben ser conocidas con la

finalidad de proporcionar una visión técnica acerca de las limitaciones que tiene el equipo.

Presión.- Se define como el resultado de una fuerza ejercida sobre un área, aunque la presión es una cantidad absoluta, las mediciones de presión diarias tales como la presión de las ruedas, son usualmente relativas a la presión del ambiente, por lo tanto es importante distinguir entre los tipos de presiones medidas.

Presión absoluta.- Tiene como nivel cero al vacío, así pues ésta es igual a la presión medida más la presión atmosférica.

Presión medida.- Tiene como nivel cero a la presión atmosférica, así pues ésta es igual a la presión absoluta menos la presión atmosférica.

Presión diferencial.- Es la diferencia de presión entre dos puntos.

Existen dos tipos de presiones que pueden ser medidas, la presión estática y la presión dinámica. La presión estática es

uniforme en todas las direcciones, así pues las presiones medidas son independientes de cualquier dirección en un fluido estático. El flujo ejerce presiones adicionales sobre las superficies perpendiculares a la dirección del flujo, estos componentes direccionales de presión en un fluido en movimiento se manifiestan a través de la presión dinámica. Un instrumento encarando la dirección del flujo además de la presión estática mide la presión dinámica determinando una medida conocida como presión total. Mientras la presión estática determina las cargas sobre las paredes de la tubería, la presión dinámica es utilizada para medir las caídas de presión a lo largo de una línea de flujo. La presión dinámica puede ser medida calculando el diferencial de presión entre instrumentos paralelos colocados sobre la misma línea y perpendiculares al flujo.

Mientras la bomba hidráulica del limpiador de núcleos con CO_2 esté presurizando la cámara de alta presión, existirán presiones dinámicas, por otro lado, al detenerse el bombeo la presión medida será estática, ésta es la presión a la que el sistema debe permanecer durante el remojo de los núcleos.

Medidores de presión.- Los instrumentos indicadores de presión son los llamados medidores de presión. Este equipo utiliza dos medidores de presión, uno colocado sobre la cámara de alta presión y otro sobre el pulsation dampener, cada uno tiene un rango de medida que va de 0 a 3000 psi. Un manómetro es un instrumento de medición de presión, el término manómetro es a menudo utilizado para referirse específicamente a los instrumentos hidrostáticos de columna de líquido. La figura 3.10 muestra uno de los medidores de presión del limpiador de núcleos con CO₂ marcando 1200 psi durante el proceso de limpieza de núcleos.



Fig. 3.10 Medidor de presión a 1200 psi
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

El medidor de presión de tubo Bourdon fue patentado en 1849 en Francia por Eugene Bourdon. Los medidores de presión o también llamados manómetros se basan en el mecanismo de funcionamiento mostrado en la figura 3.11 el cual se describe a continuación.

El elemento sensor de presión es un tubo enrollable conectado a la tubería en la cual se mide la presión, a medida que la presión se incrementa el tubo tiende a desenrollarse, caso contrario el tubo se enrollará nuevamente, este movimiento es transferido a través de un enlace a un engranaje conectado a un resorte y a su vez al indicador de aguja. La aguja es presentada en el frente de una tarjeta en la que se establecen las presiones a ser medidas. Consta de partes mecánicas movibles y partes fijas.

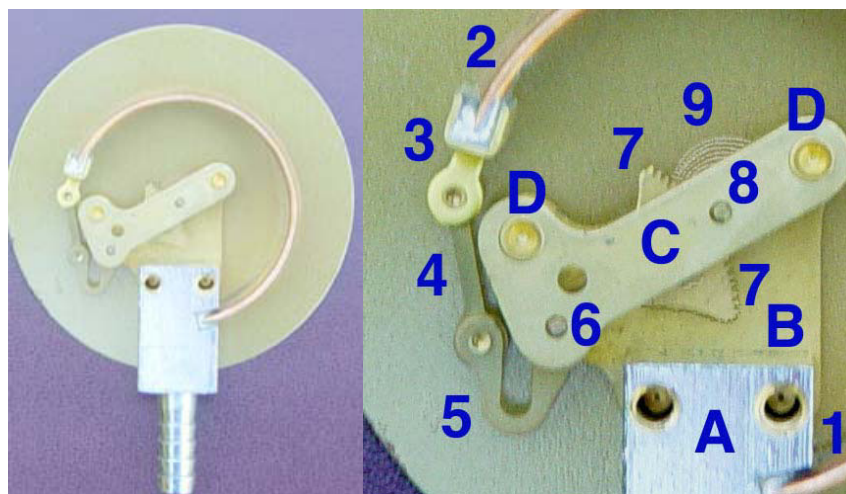


Fig. 3.11 Detalles del mecanismo del manómetro

(Fuente: wikipedia.org, Agosto 2007)

Partes fijas

- A.** Bloque receptor: Es la conexión entre la línea de flujo y la parte fija del tubo de Bourdon (1), además asegura la placa al chasis (B). Los dos huecos reciben tornillos que aseguran la carcasa.
- B.** Placa chasis: La cara de la tarjeta frontal es parte de esta, contiene los huecos de los ejes de los engranes
- C.** Placa chasis secundaria: Es el apoyo del otro extremo de los ejes de los engranes.
- D.** Pasadores que unen a las dos placas chasis

Partes móviles

1. Extremo estacionario del tubo Bourdon. Este está conectado con la tubería a través del bloque receptor.
2. Extremo móvil del tubo Bourdon. Extremo sellado.
3. Pivote y pin pivote
4. Cadena que junta el pin pivote a la palanca con pines (5) para permitir la rotación de la junta.
5. Palanca. Esta es una extensión del sector de engranes (7).
6. Pin eje de engranes.
7. Engranes.
8. Eje del indicador de aguja.
9. Resorte ensortijado. Precarga el tren de engranes para eliminar fluctuaciones bruscas.

Líneas de flujo.- Las líneas de flujo utilizadas en los tramos de alta presión están hechas de acero inoxidable y sin costuras o sueldas intermedias. Esta tubería tiene 1/4" de diámetro externo por 1/8" de diámetro interno y puede resistir presiones máximas de trabajo de hasta 10000 psi. En la tapa de la cámara de alta presión existen pequeños tramos de líneas de 1/16" de diámetro interno capaces de resistir presiones de hasta 8000 psi.

Entre los accesorios asociados a estas líneas de flujo están las tuercas y conos aislantes o sellos, utilizados para acoplar uniones, reductores, acoples en T, etc. Estos accesorios evitan fugas o liqueos lo cual facilita el ensamblaje de redes de flujo de alta presión. La figura 3.12 muestra algunos accesorios asociados a las líneas de flujo de alta presión.

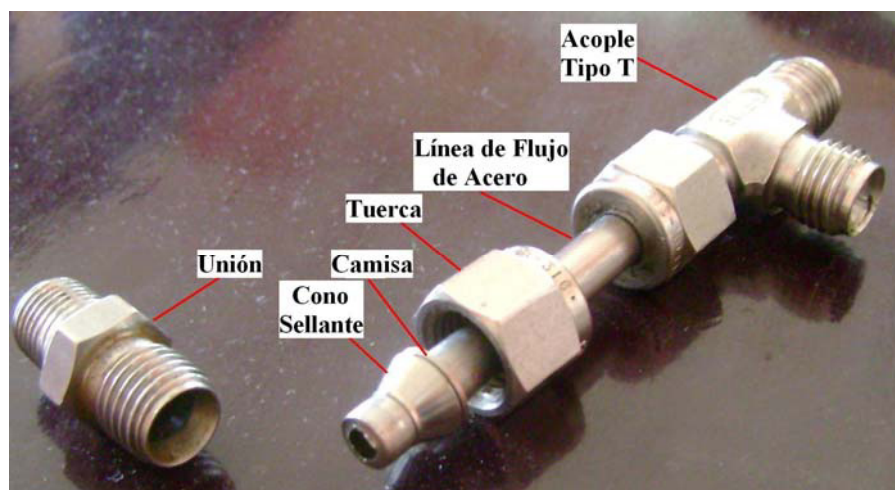


Fig. 3.12 Líneas de flujo y accesorios

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

3.1.4 Sistema de despresurización, válvulas y accesorios

Un equipo que contiene fluidos a alta presión es peligroso cuando no se manipula con las precauciones del caso, por esta razón el limpiador de núcleos con CO₂ tiene un completo juego de válvulas que permiten direccionar y controlar el flujo en las

líneas para despresurizar el sistema una vez que este ha cumplido con su trabajo. Existen cuatro válvulas manuales de alta presión en este equipo, una válvula de una vía y tres válvulas de tres vías.

Válvula de una vía.- Esta válvula marca “Hidro-Neumo” permite el flujo de un punto a otro en ángulo recto, está hecha de acero inoxidable con una presión de trabajo de hasta 3000 psi, sus puertos de entrada y salida son de 1/4” de diámetro interno. En este equipo ésta válvula cumple con la función de controlar el flujo a través de la línea de recirculación, la línea de recirculación permite que el tolueno pueda salir desde el tanque a través de la bomba, inundar las líneas de flujo y retornar al tanque de depósito del tolueno. La figura 3.13 muestra el mecanismo de recirculación que utiliza el limpiador de núcleos con CO₂. La figura 3.14 muestra las partes internas de la válvula de recirculación.



Fig. 3.13 Línea y válvula de recirculación
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)



Fig. 3.14 Partes internas de la válvula de recirculación
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

1. Tornillo de ajuste
2. Resorte
3. Plato
4. Asiento del resorte
5. O'ring
6. Vástago y aguja
7. Asiento de aguja
8. Cuerpo

Esta válvula permite controlar el paso del flujo manualmente pero solo en el sentido que indica la válvula, la carcasa y asiento están hechas de una sola pieza, en el asiento existe un orificio con o'ring muy pequeños a través del cual pasa el fluido desde abajo hacia arriba únicamente, la aguja se asienta sobre una base plana que tiene un orificio en el centro, sobre este agujero se acopla la aguja del vástago cuando se cierra el flujo, para cortar el flujo la aguja que es parte del cuerpo del vástago es presionada sobre el asiento por medio de un resorte que se encuentra en la sección superior de la válvula, el resorte es liberado o presionado por el tornillo de ajuste el cual es manipulado para abrir o cerrar el flujo.

Válvulas de tres vías.- Las válvulas de tres vías del costado inferior de la cámara de alta presión y de las líneas de flujo hidráulicas están hechas por el mismo fabricante, siendo distinto el caso de la válvula de tres vías de la tapa de la cámara. Estas válvulas tienen distintas opciones de flujo.

La válvula marca “Whitey/Swagelok” de tres vías modelo SS-43XS4-S4-M4 colocada en la parte inferior lateral de la cámara de alta presión tiene dos posiciones de flujo. En una posición tiene dos funciones; Previo a la limpieza de los núcleos, permite la entrada de CO₂ desde la bombona a la cámara, luego de la limpieza permite el drenaje de la cámara. En la posición contraria permite la entrada de tolueno desde la bomba a la cámara. La figura 3.15 muestra la válvula de tres vías de la cámara de alta presión abierta en la posición de flujo en la que el líquido ingresa desde la bomba hacia la cámara.



Fig. 3.15 Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

La válvula de tres vías modelo SS-42X-S4 de las líneas de flujo, permite el paso del tolueno desde la bomba a la cámara en una posición, mientras que en la posición contraria permite el paso del fluido desde la cámara hacia el tanque de tolueno. La figura 3.16 muestra las partes internas y las posiciones de flujo que ofrecen las válvulas de tres vías Whitey/Swagelok. Parte del cuerpo de la válvula son los puertos de 1/4" y tienen una presión de trabajo de hasta 3000 psi. En el anexo E se detallan las dimensiones de los modelos de las válvulas anteriormente mencionadas. Ambos modelos de válvulas no permiten el libre flujo entre los puertos 2 y 3.

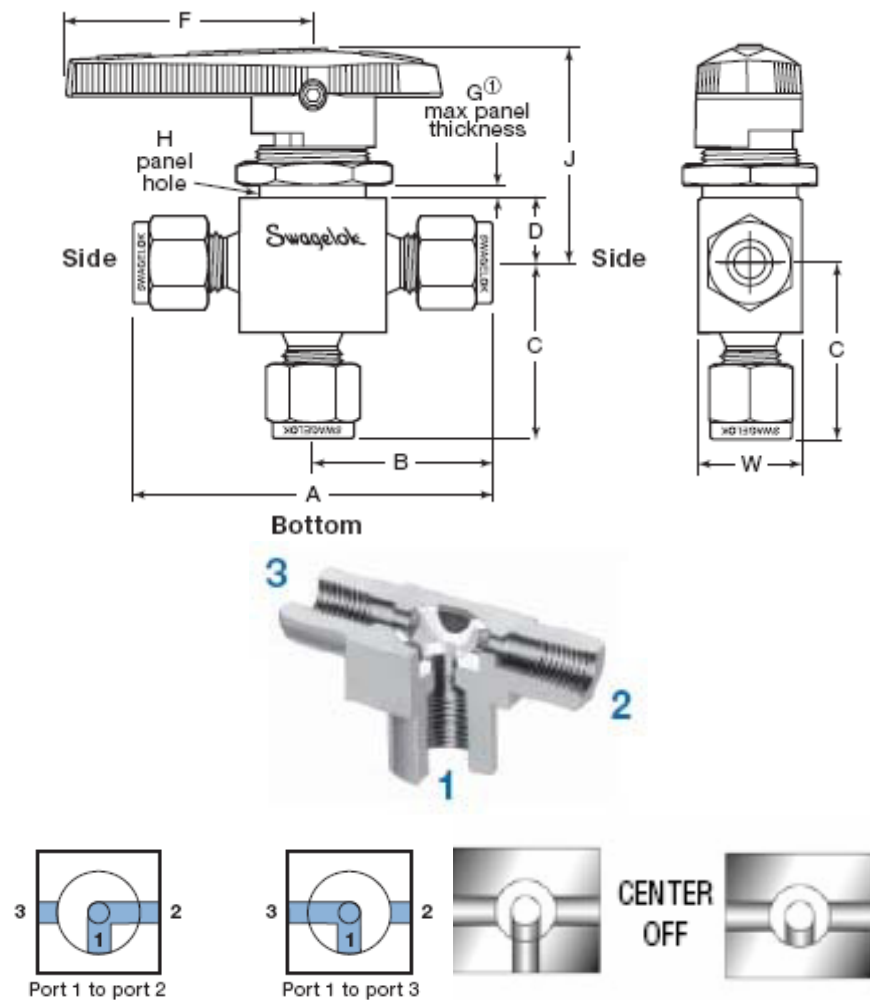


Fig. 3.16 Diagrama de la válvula Whitey/Swagelok de tres vías y posiciones de flujo

(Fuente: swagelok.com, Agosto 2007)

La válvula de tres vías marca “HIP” está colocada en la tapa de la cámara, permite el paso libre del fluido desde la cámara hacia el manómetro mientras controla el paso de fluido desde la cámara hacia el exterior del equipo, en esta posición cumple el

papel de válvula de alivio manual según se muestra en la figura 3.17.



Fig. 3.17 Válvula de alivio instalada sobre la tapa de la cámara

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

La válvula HIP tiene puertos hembra de 1/4" de diámetro interno y una presión de trabajo máxima de 10000 psi. Esta válvula permite el libre flujo entre los puertos F y G mientras controla el flujo en E, tal como lo muestra la figura 3.18.

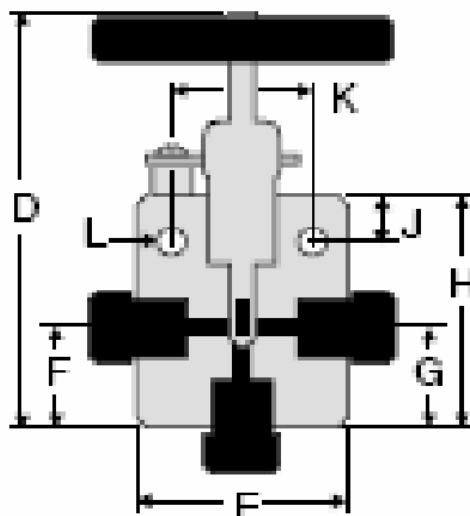


Fig. 3.18 Configuración interna de la válvula de alivio

(Fuente: highpressure.com, Agosto 2007)

Accesorios.- Se han identificado tres accesorios importantes del equipo tanto en el área neumática como en la hidráulica, estos son:

- » Regulador neumático de filtro
- » Pulsation dampener
- » Válvula check

Regulador neumático de filtro.- Los reguladores juegan un rol importante en la preparación del aire para sistemas neumáticos. Este componente regula el flujo del aire que ingresa a un equipo neumático, atenúa fluctuaciones que

pueden ocurrir en el sistema debido al flujo del aire y provee de niveles consistentes de presión. Un regulador de aire proporciona una presión constante al nivel de presión deseado aunque la presión de entrada de aire al regulador sea mucho mayor.

Puesto que el limpiador de núcleos utiliza una bomba hidráulica de acción neumática, la bomba requiere de un regulador neumático de filtro que provea de un flujo de aire constante y regulado a la presión requerida. La figura 3.19 muestra el tipo de regulador utilizado para la bomba.

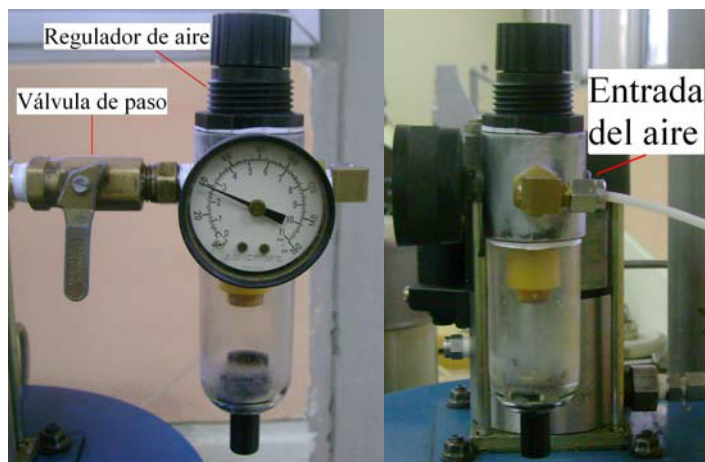


Fig. 3.19 Regulador conectado a una fuente de aire
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Existe una válvula de bola colocada entre el regulador y la bomba, esta válvula de paso sirve para cortar el flujo de aire de manera inmediata parando el bombeo automáticamente.

Este regulador es capaz de soportar presiones de trabajo de hasta 150 psi, la función de la copa es de recolectar el agua producto de la condensación de la humedad del aire, la cual es desalojada a través del drenaje en su parte inferior, mientras que el filtro impide el paso de impurezas que puedan existir en el aire. La figura 3.20 muestra el regulador abierto y sus componentes.

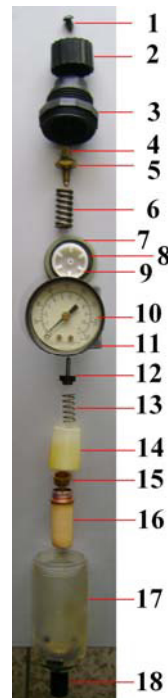


Fig. 3.20 Partes internas del regulador de aire
(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

1. Tornillo del manubrio
2. Manubrio
3. Tapa
4. Tornillo de ajuste
5. Contratuerca
6. Resorte
7. Anillo de respaldo del diafragma
8. Diafragma
9. Plato (Presiona el eje del obturador)
10. Manómetro
11. Cuerpo
12. Obturador
13. Resorte actuador
14. Cono
15. Asiento del resorte actuador
16. Filtro de entrada del aire
17. Copa para condensados del aire
18. Drenaje con válvula check

El regulador entra en funcionamiento cuando el aire ingresa por el orificio de entrada hacia la copa transparente, pasa a través

del filtro de aire, el obturador abre y cierra el paso del aire de acuerdo a la regulación que se requiere, el aire actúa con el diafragma para amortiguar posibles fluctuaciones y sale por el orificio del lado izquierdo.

El obturador se abre y se cierra al paso del aire debido al movimiento del tornillo y la contratuerca, la contratuerca presiona al resorte sobre el plato el cual a su vez empuja al obturador regulando así la presión del aire, luego el obturador vuelve a cerrarse debido al empuje del resorte actuador.

Para garantizar el adecuado funcionamiento del regulador de aire se hizo necesario el chequeo de sus partes internas, una de las partes más sensibles es el diafragma, el diafragma no es más que una membrana especial de caucho que suele presentar caliches y que en el caso de este regulador se encontró en buen estado así como también los anillos y sellos correspondientes.

Pulsation dampener.- La traducción al lenguaje español más apropiado que podría dársele a este dispositivo sería “eliminador o atenuador de pulsaciones”. Las bombas de

desplazamiento positivo como la utilizada en este equipo de lavado de núcleos dificultan mantener la presión en un nivel constante, más bien por el contrario, crean pulsaciones o choques hidráulicos debido a los golpes que estas generan en cada desplazamiento, lo cual representa potencialmente un daño al sistema hidráulico y principalmente a los medidores de presión. Por las razones anteriormente expuestas se hace necesario el uso de dispositivos que eliminen o disminuyan los cambios bruscos de presión protegiendo al sistema de posibles daños, a estos dispositivos se los conoce con el nombre inglés de “pulsation dampeners”.

El limpiador de núcleos con CO₂ cuenta con una sección cilíndrica ciega de 1/2” de diámetro interno que cumple el papel de pulsation dampener, cuyo funcionamiento permite que el líquido ingrese por su parte inferior lateral de tal manera que el aire atrapado en el lado superior ciego del cilindro actúe como un colchón que suaviza el efecto de los cambios bruscos de presión producidos por los estroques de la bomba. Esta sección tubular marca Haskel es capaz de soportar presiones de trabajo de hasta 6000 psi. La figura 3.21 muestra el ingreso del líquido al interior del pulsation dampener.



Fig. 3.21 Entrada de líquido al pulsation dampener

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Válvula check.- Las válvulas check son aquellas que permiten el flujo en una sola dirección y se las utiliza en líneas de flujo en las que se desea garantizar el paso de un fluido en un solo sentido, evitando así el contraflujo cuando la circulación del fluido se detiene.

La válvula check de acero inoxidable de la línea de carga de CO₂ (Fig.3.22), es utilizada como un accesorio de seguridad que impide que haya contraflujo durante la carga de CO₂,

además evita que haya una salida descontrolada de tolueno cuando la cámara se encuentra presurizada por encima de 1000 psi y la válvula de tres vías haya sido direccionada de manera accidental hacia la línea de drenaje.



Fig. 3.22 Válvula check de 1/8" de diámetro interno

(Fuente: swagelok.com, Agosto 2007)

La válvula check utilizada en este equipo es capaz de soportar una presión de trabajo de hasta 6000 psi en contraflujo y requiere una presión de entre 1/3 a 10 psi para habilitar el paso del fluido. La figura 3.23 muestra los componentes internos y el sentido del flujo a través de la válvula.

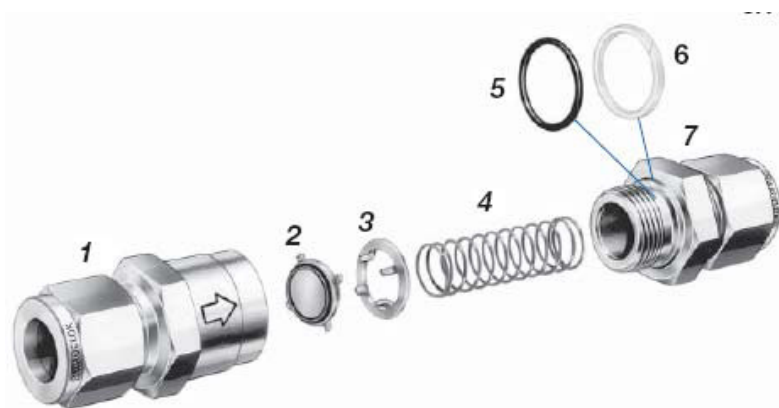


Fig. 3.23 Mecanismo interno de la válvula check

(Fuente: swagelok.com, Agosto 2007)

1. Puerto de entrada
2. Obturador
3. Asiento del obturador
4. Resorte
5. O'ring
6. Anillo de respaldo
7. Puerto de salida

3.1.5 Bombona de gas CO₂

El suministro eficiente de dióxido de carbono es indispensable para el rendimiento del equipo a la hora de lavar los núcleos, por esta razón cualquier fuente de CO₂ que se requiera utilizar debe ser capaz de proveer el gas a una presión que pueda ser regulada hasta 200 psi. Para un adecuado proceso de lavado de las muestras se requiere cargar la cámara con una presión de entre 100 a 200 psi, si la línea de carga y el regulador de CO₂ son de alta presión el lavado puede ser mucho más eficiente si se carga el gas en la cámara a presiones de hasta 350 psi.

El Laboratorio de Petróleos de la ESPOL dispone de bombonas capaces de contener CO_2 a más de 1000 psi, es importante tener en cuenta que normalmente en éste laboratorio se utilizan líneas de teflón que conectan la bombona con el limpiador de núcleos y cuya presión de trabajo es de hasta 200 psi. El uso de acoples adecuados que conecten la bombona con el limpiador de núcleos, evitarán fugas de gas que demoren el proceso de carga además de evitar un bajo nivel de presión en la cámara. La figura 3.24 muestra la bombona y los accesorios utilizados.



Fig. 3.24 Entrada de CO_2 desde la bombona
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

3.2. Mantenimiento

Existen dos tipos de mantenimiento al que puede someterse este equipo de lavado de núcleos, el mantenimiento preventivo y el mantenimiento correctivo. El mantenimiento preventivo se lo realiza con la finalidad de evitar futuros daños o de alargar la vida útil del equipo y sus partes, mientras que el mantenimiento correctivo se lo realiza con la finalidad de reparar daños existentes o reemplazar piezas que ya no tienen arreglo.

Mantenimiento preventivo

- Luego de cada uso, lubricar la rosca de la cámara de alta presión. Utilizar grasas ligeras.
- Luego de cada dos veces que el equipo haya sido utilizado, secar la humedad acumulada en el filtro de salida del aire de la bomba (Fig.3.25).
- Cada vez que el rendimiento de la bomba disminuya, lubricar la camisa y pistón, o'rings, válvula de ciclo y válvula piloto de la sección de aire (Fig.3.26 y 3.27). Utilizar grasas ultraligeras o grasas para mecanismos plásticos, no utilizar aceites.
- Limpiar frecuentemente el equipo con sustancias no corrosivas.



Fig. 3.25 Entrada y salida de aire de la bomba
(Fuente Colón López, Septiembre 2007)



Fig. 3.26 Partes internas de la bomba
(Fuente: Colón López, Septiembre 2007)

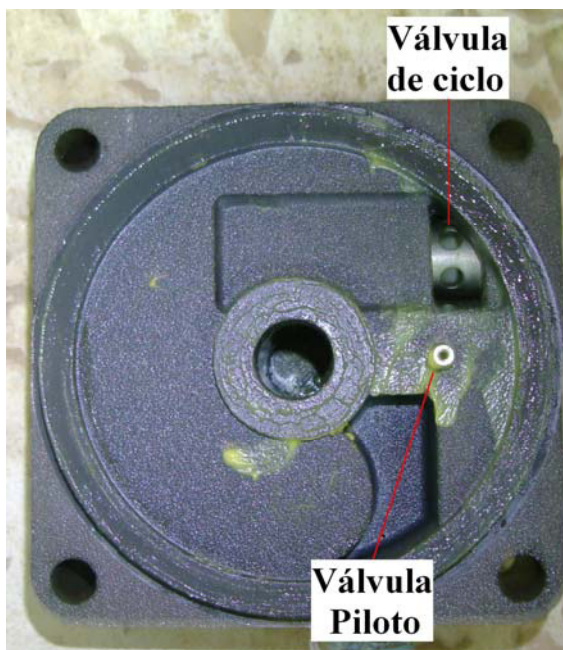


Fig. 3.27 Tapa de la sección neumática de la bomba
(Fuente: Colón López)

Mantenimiento correctivo.- En caso de que alguna avería se presente y esta sea susceptible de reparación alguna, es importante tener en cuenta que dicha reparación debe ser garantizada para soportar altas presiones de trabajo. Si resulta imposible la reparación de alguna pieza o parte del equipo, ésta deberá ser reemplazada por alguna que tenga similares características mecánicas que garantice el adecuado funcionamiento del sistema.

CAPITULO 4

4. PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Una vez que ya se conocen las partes del equipo, el papel que desempeñan y sus limitaciones, es necesario conocer con detalle el funcionamiento de todo el sistema en conjunto. Un adecuado procedimiento de operación permitirá que el equipo cumpla de una manera efectiva con el objetivo para el cual fue diseñado.

Durante el desarrollo de este proyecto fue necesario realizar un procedimiento que permitiera calcular el nivel de efectividad del lavado, además de las ventajas y desventajas al utilizar el limpiador de núcleos con CO₂ y obtener porcentajes referenciales de limpieza mediante el uso del extractor soxhlet.



CIB-ESPOL

La razón por la que es importante obtener porcentajes de limpieza que sirvan de referencia mediante el uso del extractor soxhlet, se debe a que este equipo ha sido utilizado durante varios años para lavar los núcleos saturados con petróleo en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL. Puesto que se ha requerido del uso del extractor soxhlet, es importante conocer de manera general acerca del funcionamiento de este equipo.

El Extractor Soxhlet.- Este equipo disponible en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL es utilizado para determinar la saturación de agua contenida en un núcleo, en el proceso de determinar dicha saturación se realiza el lavado del núcleo con tolueno.

El extractor soxhlet está ensamblado con partes de cristal entre las cuales constan un matraz volumétrico, una trampa de agua (opcional), un extractor con un dedal (dedal opcional) porta núcleos, un condensador y un calentador eléctrico sobre el cual se coloca el matraz con tolueno, normalmente al 50% de su capacidad. La figura 4.1 muestra dos extractores soxhlet utilizados en la limpieza de núcleos.

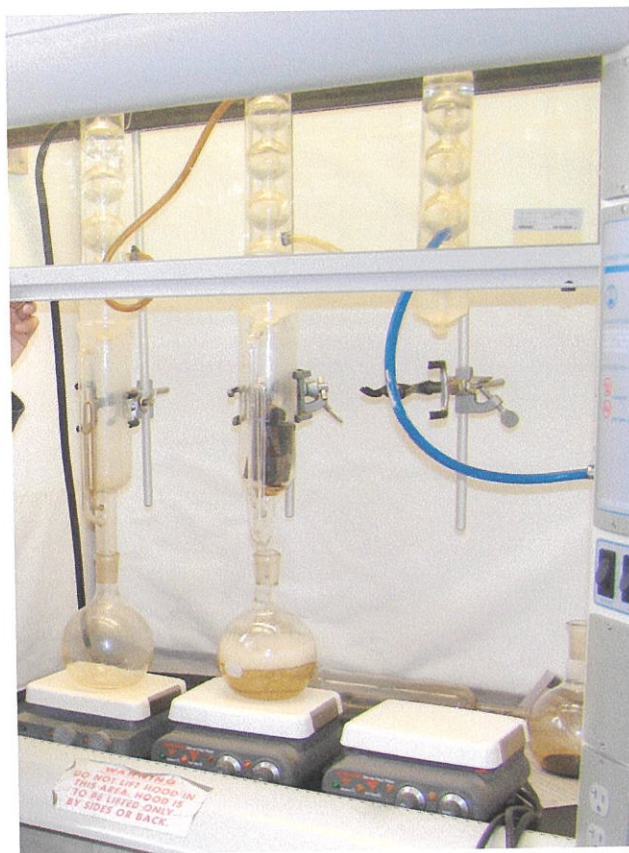


Fig. 4.1 Extractor soxhlet lavando núcleos
(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)

Los núcleos a ser lavados se colocan en el extractor, se inicia la circulación de agua en el condensador y luego se enciende el calentador sobre el cual se encuentra el matraz con tolueno dando inicio a la vaporización, los vapores del tolueno se condensarán debido a la circulación de agua en el serpentín del tubo condensador, este tolueno condensado es conocido como destilado y es el que baña el núcleo en el extractor, el nivel del tolueno dentro del extractor sube y baja periódicamente debido al sistema de sifón con el que cuenta el extractor,

para que este proceso de lavado sea efectivo los núcleos deben permanecer en el extractor hasta que el tolueno que los baña se encuentre relativamente limpio, posteriormente los núcleos son secados en el horno de vacío a 70 °C por 24 horas, finalmente se registra el peso del núcleo limpio y se realizan los cálculos pertinentes.

4.1. Características físicas y visuales de los núcleos antes y después de ser limpiados

Este procedimiento de observación de los núcleos se lo realizó con el objetivo de identificar ciertos cambios en cada una de las muestras a fin de establecer diferencias que se presentaren luego de haber sido lavadas a alta presión en el limpiador de núcleos con CO₂. Cabe mencionar que este procedimiento de observación se lo realizó exclusivamente para determinar parámetros de análisis sobre el desempeño de este equipo, por lo tanto en aquellas situaciones normales del proceso de lavado de núcleos con este sistema no es necesario registrar los cambios físicos que presenten las muestras.

Una característica visual tuvo que ver con posibles fisuras o fracturas que pudieren presentarse en los núcleos luego del lavado, mientras que las características físicas consideradas las más importantes para este proceso de limpieza fueron:

- Longitud y diámetro
- Peso de los núcleos, antes y después de ser lavados

Importancia de la longitud y diámetro de los núcleos.- Puesto que en el proceso de lavado de núcleos con CO₂ se aplica alta presión sobre las muestras, es importante determinar con la mayor exactitud posible sus dimensiones ya que podría producirse una alteración en su forma dadas las condiciones a las que se someten las muestras.

La determinación de las dimensiones de las muestras luego de cada lavado permite constatar la existencia de cambios en la forma de los núcleos, sobre todo en aquellas muestras poco compactas susceptibles de cambios en su forma aún por simple manipulación.

Importancia del peso de las muestras.- En el desarrollo de las pruebas de laboratorio, el peso de las muestras es uno de los parámetros más importantes a ser considerado, ya que sobre éste se basan los cálculos que determinarán el porcentaje de limpieza de los núcleos. El peso es registrado antes y después de cada paso que incluya cambio en dicho parámetro.

Puesto que el extractor soxhlet es un equipo en el cual se pueden lavar hasta 10 muestras simultáneamente de una pulgada de diámetro y 3.7 cm de longitud mediante el uso de un extractor grande, y si se utiliza un extractor pequeño hasta 4 núcleos, se ha considerado lavar las muestras en las que se establezcan las mayores diferencias de peso.

4.2. Calibración y ajustes

Antes de iniciar con la operación del limpiador de núcleos con CO₂ es importante cerciorarse de las condiciones en las que se encuentra, es decir observar los medidores de presión ya que el sistema puede estar presurizado, saber si el equipo está operativo o si existen observaciones que deben ser tomadas en cuenta para garantizar su buen desempeño y sobre todo la seguridad del operador.

Es importante que el nivel de tolueno dentro del tanque sea el adecuado para evitar que la bomba cavite, antes de iniciar con el proceso de lavado, el nivel debe ser de por lo menos las dos terceras partes (5.33 litros) de la capacidad total del tanque, durante el proceso de lavado, a medida que se consume el tolueno, el nivel mínimo debe ser de hasta un tercio (2.67 litros) de la capacidad del

tanque, esto debido a que la succión de la bomba tiene una elevación de 6.915 centímetros con respecto a la base del tanque.

Este equipo requiere de una adecuada alimentación neumática para la bomba hidráulica, esta alimentación puede obtenerse mediante el uso de un compresor de aire o mediante el uso de una bombona que contenga aire comprimido. El equipo utiliza un regulador de aire con filtro el cual no debe ser alimentado con una presión neumática mayor a 150 psi, ya que presiones superiores pueden causar el estallido de la copa transparente del regulador.

Es importante chequear el sentido del flujo de la válvula check de la línea de carga de CO₂, ya que ésta debe estar colocada en el sentido que permita el paso del fluido desde la bombona hacia la cámara de alta presión, si la válvula check ha sido mal colocada no habrá carga de CO₂ en la cámara y la línea de teflón de la bombona se presurizará aumentando el riesgo de estallido, esta línea de teflón puede soportar una presión de hasta 200 psi.

El regulador de la bombona de CO₂ debe tener un rango de calibración mínimo de 0 a 300 psi. Durante la carga de CO₂ el regulador de la bombona debe ser calibrado a presiones que se



encuentren entre 100 y 200 psi. Se ha comprobado durante pruebas en otros laboratorios que presiones de carga de CO₂ pueden arrojar mejores resultados en cuanto a la limpieza de núcleos, por tanto se sugiere trabajar con presiones de CO₂ de hasta 350 psi, siempre y cuando el regulador de la bombona y la línea de flujo que se conecta a la entrada de CO₂ del equipo sean las apropiadas para soportar dichas presiones.

Es importante conocer de antemano que una vez que el equipo está en funcionamiento, el bombeo se detiene inmediatamente cuando la válvula de paso del aire entre el regulador y la bomba hidráulica se cierra.

4.3. Procedimiento para realizar la limpieza de núcleos

Metodología del proceso de limpieza de núcleos.- Una vez que se han realizado las calibraciones y ajustes mencionados en el subcapítulo anterior, se seleccionan los núcleos a ser lavados que están saturados con petróleo, se procede a envolverlos en una maya de nylon, ésta maya evita que las muestras choquen entre si durante el llenado de la cámara con tolueno, la maya mantiene al paquete compacto y ajustado al cuerpo cilíndrico de la cámara (fig.4.2).

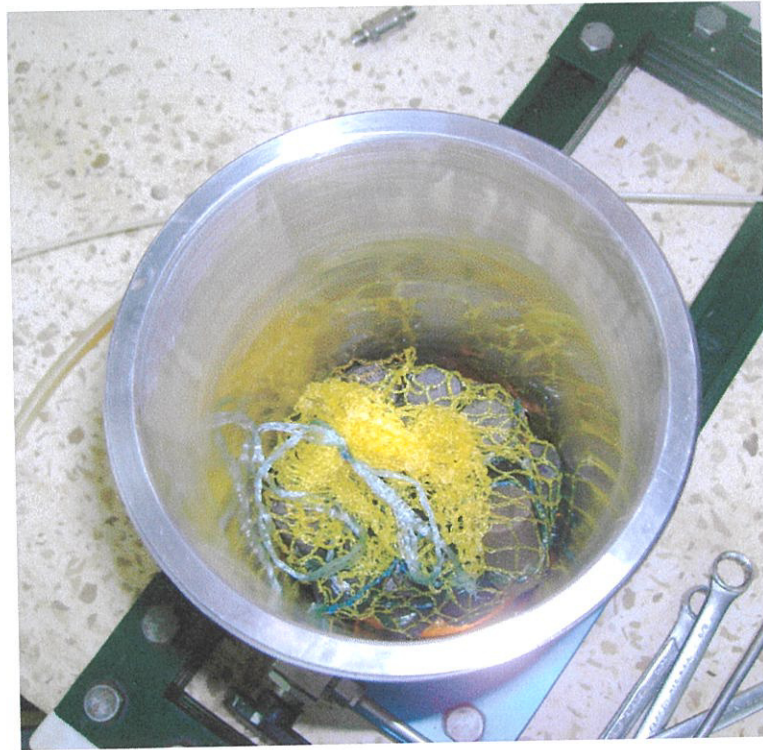


Fig. 4.2 Maya de nylon con núcleos
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Una vez colocados los núcleos dentro de la cámara, ésta es cerrada ajustando la tapa fuertemente, se presurizan los núcleos con dióxido de carbono desde la bombona de gas a una presión regulada de entre 100 a 200 psi, posteriormente se incrementa la presión dentro de la cámara bombeando tolueno hasta alcanzar una presión que se encuentre entre 1050 y 1200 psi, así se formará una mezcla de una sola fase a medida que el CO_2 se disuelve en el tolueno, remojar las muestras en la mezcla al rango de presión indicado anteriormente durante 24 a 48 horas, finalmente despresurizar la cámara y drenar el

solvente, este proceso debe repetirse hasta que el fluido drenado este relativamente limpio.

A continuación, se enumeran las válvulas y otros accesorios mostrados en la figura 4.3 con el fin de identificar y explicar minuciosamente el procedimiento de operación que será descrito posteriormente.



Fig. 4.3 Numeración de las válvulas
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

1. Válvula de paso
2. Válvula de recirculación
3. Válvula de tres vías de las líneas de flujo
4. Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
5. Válvula de alivio
6. Válvula check

Manejo de las válvulas del equipo para realizar el proceso de lavado.- Se deposita el paquete de núcleos dentro de la cámara, se ajusta fuertemente la tapa y se cierra completamente la válvula # 5, la válvula # 4 es direccionada en el sentido que permite el flujo desde la bombona hacia la cámara, con la válvula # 6 colocada en la dirección de flujo desde la bombona hacia la cámara, se inicia el llenado del CO₂ ajustando paulatinamente el regulador de la bombona a una presión que debe estar entre 100 a 200 psi. Se recomienda chequear los manómetros del regulador de la bombona y del equipo ya que al final del proceso de carga ambos deben medir lecturas similares, si el medidor de presión de la cámara no muestra lectura puede ser que exista fuga del gas en algún tramo de la línea.

Una vez que la presión del CO₂ en la cámara ha alcanzado el nivel requerido se cierra la válvula # 4, con la válvula # 1 cerrada se ajusta



mediante el regulador la presión del aire que alimenta la bomba a 40 psi (a mayores presiones neumáticas, mayores presiones hidráulicas, lo cual pone en peligro la integridad del equipo), se abre la válvula # 2 de recirculación (el procedimiento de recirculación es necesario cuando el equipo ha estado fuera de operación durante largos periodos y/o cuando la succión de la bomba y líneas de flujo están vacías) y la válvula # 3 es direccionada en el sentido que permite el flujo desde la bomba hidráulica hacia la cámara, manteniendo la válvula # 4 cerrada se inicia la recirculación de tolueno abriendo la válvula # 1 que permitirá inundar las líneas de flujo y por su puesto la succión de la bomba, observando la mirilla del tanque de tolueno ocurrirán fluctuaciones en el nivel del líquido constatando así la recirculación, luego la válvula # 1 se cierra para detener el bombeo y posteriormente se cierra la válvula # 2, en estas condiciones se abre nuevamente la válvula # 1 y se observa el manómetro del pulsation dampener, en el momento en que la presión alcanza aproximadamente los 200 psi (la presión en la línea debe ser mayor que la de la cámara para evitar la salida del CO₂) se direcciona la válvula # 4 en el sentido del flujo entre la bomba y la cámara, a medida que el tolueno ingresa en la cámara de alta presión, se observa el manómetro que está sobre ésta y una vez que la presión se acerca a 1200 psi se cierra la válvula # 1 para detener el bombeo

(la bomba podría detenerse automáticamente si la presión de alimentación en el regulador está en 40 psi, aún en este caso se recomienda cerrar la válvula # 1), luego se cierra la válvula # 4 iniciándose así una etapa de estabilización de la presión dentro de la cámara que tarda alrededor treinta minutos, cada vez que la presión cae, esta debe ser reajustada a 1200 psi, una vez que la presión dentro de la cámara se ha estabilizado entre 1050 y 1200 psi, se direcciona la válvula # 3 en el sentido del flujo entre la cámara y el tanque con la finalidad de despresurizar la línea, posteriormente esta válvula es cerrada nuevamente.

Las muestras deben permanecer en remojo durante un lapso de tiempo de 24 a 48 horas para permitir al solvente remover la mayor cantidad de petróleo de los núcleos.

4.4. Procedimiento de despresurización o alivio del sistema

Una vez que la etapa del remojo se ha cumplido, es momento de sacar las muestras de la cámara siguiendo un procedimiento que garantice la seguridad del operador ante todo.

Existen dos maneras de despresurizar la cámara, la una es abriendo paulatinamente la válvula de alivio # 5 hasta que la presión

disminuya, y la otra es direccionando las válvulas # 3 y # 4 de tres vías hacia el tanque de tolueno. El problema con el segundo método es que primero se debe drenar el tolueno limpio que podría haber quedado en el tanque para evitar que éste se mezcle con el fluido contaminado producto del lavado, este procedimiento se lo recomienda únicamente en caso de que no existan recipientes disponibles para recoger el fluido contaminado de la cámara.

Se recomienda el primer método para realizar la despresurización de la cámara ya que éste permite evacuar el fluido contaminado fuera del equipo. Colocar un recipiente que recoja el líquido que sale a través de la válvula de alivio # 5, ésta debe ser abierta suavemente para evitar que el CO₂ se gasifique intempestivamente arrastrando consigo al tolueno contaminado con petróleo, cuando la presión en la cámara esté entre 100 y 200 psi, la válvula # 5 puede cerrarse, la válvula check # 6 debe ser removida cuidadosamente de la línea de carga de CO₂ y en su lugar se conecta una manguera, a través de ésta y por efecto de la presión remanente en la cámara se drena el tolueno contaminado con petróleo siempre y cuando la válvula de tres vías # 4 se direcciona en la posición del flujo desde la cámara hacia el drenaje.

Dependiendo del color del fluido drenado se determinará la necesidad de realizar un segundo proceso de limpieza, si el fluido drenado está limpio puede darse por terminado el lavado en este equipo. Finalmente se abre totalmente la válvula # 5 para asegurar la completa salida de gases y proceder a abrir lentamente la tapa de la cámara de alta presión.

Los núcleos lavados con este equipo salen parcialmente saturados con tolueno, por lo que deben ser secados en el horno de vacío durante 24 horas a una temperatura de 60 °C aproximadamente.

4.5. Pruebas de laboratorio y resultados obtenidos

Las pruebas de laboratorio que se realizaron fueron de dos tipos; pruebas preliminares y una definitiva.

Las pruebas preliminares fueron realizadas para comprobar el buen funcionamiento mecánico de todo el equipo a alta presión, además fue necesario preestablecer la capacidad de limpieza del equipo y adquirir destreza en el juego de válvulas que se realiza durante su operación.

La realización de una prueba definitiva tuvo como objetivo enmarcar en una situación real la determinación del porcentaje de petróleo removido en presencia de agua utilizando núcleos saturados con ambos fluidos.

Para el adecuado funcionamiento del limpiador de núcleos se realizaron ciertos cálculos que permitieran manejar con seguridad el equipo durante el proceso de lavado, puesto que se trataba de la primera vez que se ponía en funcionamiento este dispositivo estos cálculos estaban enfocados a determinar la presión neumática necesaria para alcanzar una presión hidráulica de paro de la bomba además de evitar una posible sobrepresión en la cámara, mientras que en el caso del CO₂ los cálculos estaban enfocados a determinar la cantidad de este gas dentro de la cámara cuando la presión de carga del CO₂ fuere de 100, 150 y 200 psi.

Para los cálculos relacionados con la bomba hidráulica, es importante tener en cuenta que el diferencial de área utilizado es el real (41.4) y no el nominal (36) que es el valor que está establecido en el modelo de la bomba. Partiendo del hecho de que la presión hidráulica máxima requerida es de 1200 psi y haciendo uso de las formulas establecidas para la bomba en el capítulo 3 se tiene que:



Partiendo de la ecuación 3.2

$$P1 * A1 = P2 * A2 \quad 3.2$$

Despejando P1

$$P1 = \frac{P2}{A1/A2} \quad 4.1$$

Donde:

$P1$; Presión neumática a ser calculada

$P2$; Presión hidráulica de paro preestablecida, 1200 psi

$\frac{A1}{A2}$; Diferencial de área real, 41.4

Entonces:

$$P1 = \frac{1200}{41.4} = 28.99 \text{ psi}$$

Puesto que en el medidor de presión del regulador de aire no se establecen subdivisiones intermedias, el valor calculado se aproxima a 30 psi para efectos prácticos. En teoría, a esta presión neumática la bomba sería capaz de alcanzar una presión hidráulica de 1200 psi, presión a la que el bombeo se detendría automáticamente.

Con respecto a la cantidad de CO₂ que se carga dentro de la cámara cuando la presión es de 100, 150 y 200 psi, se realizan los siguientes cálculos considerando que los núcleos a ser lavados ocupan un 50% del volumen total de la cámara de alta presión (volumen total de la cámara, 0.889 gal \approx 3.36 litros).

Partiendo de la ecuación 2.10

$$PV = znRT \quad 2.10$$

Siendo n, número de moles

$$n = \frac{m}{M}, \text{ (mol)}$$



CIB -ESPOL

4.2

Reemplazando la ecuación 4.2 en 2.10 y despejando m

$$m = \frac{PVM}{zRT} \quad 4.3$$

Donde

P ; Presión de carga de CO₂, (100, 150 y 200)

V ; Volumen no ocupado en la cámara de presión, 1.68 litros

M ; Masa molar, (g/mol)

z ; Factor de compresibilidad o factor de desviación

R ; Constante universal de los gases, $0.082 \text{ atm}^* \text{ l} / \text{K}^* \text{ mol}$

T ; Temperatura absoluta, $27^{\circ}\text{C} \equiv 300\text{K}$ (Temperatura promedio del Laboratorio de Petróleos)

Haciendo uso de la tabla periódica de los elementos, se calcula el valor de la masa molar M para el caso del CO_2

Peso molecular del carbono: 12.0111

Peso molecular del Oxígeno: 15.9994

$M_{\text{CO}_2} = \text{Peso molecular carbono} + 2 (\text{Peso molecular oxígeno}) \quad 4.4$

$$M_{\text{CO}_2} = 12.0111 + 2 * 15.9994 = 44.0099 \approx 44.01\text{g/mol}$$

Para la determinación del factor de desviación z utilizando la gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Obert (Anexo A), se parte del cálculo de las presiones y temperaturas reducidas (ecuaciones 2.11 y 2.12) correspondientes al CO_2 para 100, 150 y 200 psi a $27^{\circ}\text{C} \equiv 300\text{K}$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad 2.11$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad 2.12$$

Suponiendo que el proceso de compresión del CO₂ en la cámara de alta presión es isotérmico debido a que éste sucede paulatinamente, la temperatura reducida será la misma para todas las presiones.

$$Tr = \frac{300}{304.1} = 0.99$$

Para 100 psi (114.7 psia), la presión reducida será

$$Pr = \frac{114.7}{1073.1} = 0.11$$

Por lo tanto, $z = 0.96$

Para 150 psi (164.7 psia), la presión reducida será

$$Pr = \frac{164.7}{1073.1} = 0.15$$

Por lo tanto, $z = 0.947$

Para 200 psi (214.7 psia), presión reducida será

$$Pr = \frac{214.7}{1073.1} = 0.2$$

Por lo tanto, $z = 0.928$

En este caso todos los valores son constantes a excepción de la presión y el factor de compresibilidad, por lo tanto reemplazando los valores en la ecuación 4.3 se calcula que:

$$m = \frac{P}{z} * \frac{(1.68l) * (44.01g/mol)}{(0.082atm * l / K * mol) * (300K)} = \frac{P}{z} * 3.01g/atm \quad 4.5$$

Para el caso de 100 psi de carga $z = 0.96$, se tiene

100 *psi* \cong 6.8 *atm*, evaluando en la ecuación 4.5

$$m = \frac{6.8atm}{0.96} * 3.01g/atm = 21.32g \text{ de CO}_2$$

Para el caso de 150 psi de carga $z = 0.947$, se tiene

150 *psi* \cong 10.2 *atm*, evaluando en la ecuación 4.5

$$m = \frac{10.2atm}{0.947} * 3.01g/atm = 32.42g \text{ de CO}_2$$

Para el caso de 200 psi de carga $z = 0.928$, se tiene

200 *psi* \cong 13.61 *atm*, evaluando en la ecuación 4.5

$$m = \frac{13.61atm}{0.928} * 3.01g/atm = 44.14g \text{ de CO}_2$$

Luego de haber realizado estos cálculos referenciales para iniciar la operación de este equipo, se procedió a depositar los núcleos saturados con petróleo dentro de la cámara de alta presión, ésta fue cargada con 100 psi de CO₂ y posteriormente se realizó el bombeo de tolueno hacia el interior de la cámara alimentando la bomba hidráulica con 30 psi de aire, como se esperaba, con esta presión neumática no fue posible alcanzar los 1200 psi calculados teóricamente y más bien la bomba se detuvo en 800 psi, debido a esto fue necesario elevar la presión neumática a 40 psi para lograr que la bomba se detuviera automáticamente en 1200 psi. Esta necesidad de aumentar la presión neumática en 10 psi representa un incremento del 33.33 % por encima del valor teórico calculado, con lo que se puede concluir que las pérdidas de energía en la bomba y líneas de flujo se aproximan a dicho porcentaje.

Por otro lado, se comprobó que el dióxido de carbono a más de disolverse en el tolueno a altas presiones y coadyuvar en la disminución de la viscosidad del petróleo, produce un efecto de arrastre de fluidos desde el interior de los núcleos debido a la gasificación que éste sufre cuando la presión en la cámara disminuye. Al término del proceso de limpieza, este efecto de arrastre evita que los núcleos queden totalmente saturados con tolueno



contaminado con petróleo, cuando el proceso de limpieza ha sido correctamente realizado, los núcleos salen de la cámara de alta presión burbujeando a través de sus poros, ello es muestra de que el CO₂ ingresó en el espacio poroso de los núcleos y que las presiones de trabajo fueron las apropiadas.

Pruebas preliminares y sus resultados.- Para realizar las primeras pruebas fue necesario saturar con petróleo un total de 24 núcleos que se encontraban disponibles en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL (fig.4.4), inicialmente se debió someter las muestras a un proceso de deshidratación en el horno convencional a una temperatura de 70°C durante 8 horas con el fin de determinar el peso de los núcleos con el espacio poroso vacío. Una vez que las muestras estuvieron completamente secas, fueron identificadas registrando sus dimensiones de longitud, diámetro y sobre todo registrando su peso inicial. Previo a la resaturación de las muestras con petróleo, éstas fueron identificadas colocándoles una pequeña cuerda con el número de nudos correspondiente al número de la muestra, ya que hasta ese momento no se tenía conocimiento de alguna tinta capaz de resistir la dispersión del tolueno. La saturación de las muestras se la realizó en el matraz de vacío con un petróleo

disponible en el laboratorio durante un lapso de tiempo de dos días, posteriormente se registró el peso de los núcleos saturados.

Durante el lavado de los núcleos en el equipo, se determinó que una vez alcanzada la presión hidráulica requerida dentro de la cámara (de 1050 a 1200 psi), ésta empieza un proceso de estabilización que puede tardar alrededor de 30 minutos, lo cual obliga a mantener la atención sobre la presión a fin de evitar que caiga por debajo de 1000 psi imposibilitando la condensación y mezcla del CO_2 con el tolueno, en el primer ensayo las muestras fueron lavadas con una presión de remojo estabilizada de 1150 psi, cuyos resultados se muestran en la tabla 1. Se debe tener presente que el parámetro más importante considerado durante estas pruebas fue el peso.



Fig. 4.4 Núcleos utilizados en pruebas preliminares
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

PRIMERA PRUEBA PRELIMINAR

Carga de CO₂ @ 100 psi

18 horas en remojo @ 1150 psi

wi: Peso de los núcleos previo al lavado

ws: Peso de los núcleos resaturados

wf1: Peso final de los núcleos al término del primer ensayo

Muestra	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Wi (g)	Ws (g)	Wf1 (g)
1	2.83	2.3	27.0	27.8	26.4
2	2.77	2.71	36.2	36.3	36
3	2.88	2,525	38.2	38.3	37.9
4	2.72	2,335	27.4	27.8	27
5	2.7	2.5	30.6	31	30.2
6	2.94	2,515	39.1	39.2	38.7
7	2.98	2.48	31.6	33.7	31.9
8	2.8	2,515	31.7	32.4	31.3
9	2,935	2,515	38.8	38.9	38.5
10	2.98	2.52	36.7	36.8	36.5
11	2,675	2.5	32.7	33	32.4
12	2,735	2.5	34.6	34.8	34.3
13	2.76	2.5	33.1	33.3	32.8
14	2.76	2,475	35.5	35.6	35.3
15	2.71	2,525	35.6	35.7	35.3
16	2.6	2.34	27.7	28	27.4
17	2,705	2,355	29.2	29.8	29
18	2,735	2.52	35.4	35.6	35.2
19	2,745	2.52	35.6	35.9	35.4
20	5.45	3.8	134.5	136.1	132.4
21	3,915	2.51	42.4	45.4	42.9
22	4,235	3.7	111.3	112.2	109.7
23	6.05	3.77	156.0	160.6	154
24	6	3.77	145.7	155.9	148.2

Tabla 1. Resultados de la primera prueba preliminar

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Esta primera prueba comprendió un lavado de una sola etapa con la que se esperaba descartar posibles fugas de fluidos, determinar

presiones adecuadas de trabajo, descartar problemas que pudieran presentarse al dejar el sistema presurizado durante 24 horas y observar resultados que confirmaran el objetivo para el cual fue diseñado este equipo. Las diferencias del peso mostradas en la tabla 1 dan cuenta de una variación en éste parámetro de los núcleos debido al cambio en las saturaciones de los fluidos y al efecto de limpieza del equipo.

Puesto que los resultados de la primera prueba fueron muy alentadores ya que en su mayoría se encontraban dentro de lo previsto, fue necesario realizar una segunda prueba de dos lavados consecutivos con la finalidad de confirmar o mejorar los resultados obtenidos anteriormente, estos resultados se registran en la tabla 2.

SEGUNDA PRUEBA PRELIMINAR

Primer lavado

Carga de CO₂ @ 100 psi

18 horas en remojo @ 1150 PSI

Segundo lavado consecutivo

Carga de CO₂ @ 100 psi

36 horas en remojo @ 1200 psi

wi: Peso de los núcleos previo al lavado

ws: Peso de los núcleos resaturados

wf2: Peso final de los núcleos al término del segundo ensayo

Muestra	Wi (g)	Ws (g)	Wf2 (g)
1	26.4	27.2	26.1
2	36	36.2	36
3	37.9	38.2	37.9
4	27	27.8	27
5	30.2	30.9	30.2
6	38.7	39.1	38.8
7	31.9	33.7	31.6
8	31.3	32.2	31.2
9	38.5	38.9	38.5
10	36.5	36.8	36.4
11	32.4	33	32.4
12	34.3	34.8	34.3
13	32.8	33.2	32.9
14	35.3	35.6	35.3
15	35.3	35.6	35.3
16	27.4	28	27.3
17	29	29.7	28.9
18	35.2	35.6	35.2
19	35.4	35.8	35.4
20	132.4	135.7	132.7
21	42.9	45.4	42.4
22	109.7	112.1	109.5
23	154	160.4	151.6
24	148.2	156	145.8

Tabla 2. Resultados de la segunda prueba preliminar
(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Los resultados de la tabla 2, confirmaron la capacidad del equipo para limpiar el petróleo que satura los núcleos dado que el peso de las muestras prácticamente volvió a ser el mismo que al inicio de los ensayos. En este ensayo también se comprobó que los núcleos no sufren daño o alteración física alguna producto de las altas presiones con las que se trabaja en el limpiador de núcleos con CO₂.

Después de haber puesto en marcha el equipo y constatado el desempeño de este método de limpieza, se hizo indispensable la realización de una prueba definitiva que se enmarcara en un contexto más real utilizando núcleos cuyos parámetros petrofísicos fueren datos conocidos y cuya determinación gozaran de un alto grado de confiabilidad.

Prueba definitiva y sus resultados.- La prueba definitiva consistió en la determinación del porcentaje individual y promedio del petróleo removido utilizando el limpiador de núcleos con CO₂ y comparar este porcentaje con el obtenido referencialmente utilizando el extractor soxhlet. Con el fin de darle un contexto real en la medida de lo posible a esta prueba, se consideró necesario el uso de núcleos que estuvieren saturados con fluidos originales del yacimiento del cual hubieren sido extraídos, debido a que no se dispone de estos núcleos en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL, se optó por la realización de una pasantía en el Laboratorio de Yacimientos del Centro de Investigaciones Geológicas Quito (CIGQ), perteneciente a Petroproducción. En el anexo J se muestra el certificado correspondiente a la pasantía en Petroproducción. Esta pasantía fue realizada desde el 7 de Noviembre hasta el 7 de Diciembre del 2007 y tuvo tres objetivos claros; Conseguir la donación de núcleos

saturados con fluidos del yacimiento del cual fueron extraídos, determinar los parámetros petrofísicos básicos de los núcleos donados y realizar una hoja de cálculo capaz de determinar el nivel de limpieza de los núcleos. Los cálculos realizados fueron elaborados con la asesoría de los ingenieros del CIGQ, cuya predisposición y colaboración resultaron muy importantes en la obtención de resultados confiables.

Para poner a prueba la hoja de cálculo fue necesario determinar el porcentaje individual y promedio del nivel de limpieza de los núcleos utilizando el extractor soxhlet y el limpiador de núcleos del CIGQ. La misma metodología de limpieza aplicada en el CIGQ sería aplicada en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL. Los núcleos asignados para éste análisis pertenecen a la formación Hollín inferior de un pozo de la Cuenca Oriente del Ecuador.

La metodología de limpieza realizada en el CIGQ, consideró primero el lavado en el limpiador de núcleos con CO_2 y luego el lavado de los mismos núcleos en el extractor soxhlet, si los núcleos lavados en el limpiador de núcleos con CO_2 obtuvieron un alto nivel de limpieza, el extractor soxhlet no sería capaz de recuperar mayor cantidad de petróleo de dichos núcleos. Este proceso de lavado se desarrolló de



la siguiente manera: Los núcleos saturados asignados para éste análisis fueron identificados con tinta china y pesados para determinar sus parámetros iniciales, seguidamente fueron lavados en el limpiador de núcleos con CO₂, luego fueron secados en el horno de vacío y finalmente pesados. Posteriormente, los mismos núcleos utilizados en la limpieza anterior fueron lavados en el extractor soxhlet, a continuación fueron secados y pesados. Cada equipo empleó un tiempo de limpieza de dos días, éste es el tiempo que usualmente le toma al extractor soxhlet realizar el lavado de núcleos.

Para determinar el peso de los núcleos con la menor saturación de fluidos posible, o en otras palabras, determinar el peso del esqueleto rocoso de los núcleos, se realizó posterior al procedimiento de lavado descrito anteriormente, una limpieza de los núcleos en el extractor soxhlet durante 5 días consecutivos y un secado en el horno de vacío de tres días, éste dato de gran importancia, permitiría determinar diferencias en el peso entre los núcleos lavados en el extractor soxhlet en situaciones normales y el peso del esqueleto de los núcleos.

Para completar los datos requeridos en la hoja de cálculo, fue indispensable la determinación de otros parámetros petrofísicos y de

fluidos de cada núcleo, estos parámetros incluyen el volumen poroso, saturación de fluidos, gravedad API del petróleo que satura las muestras y densidad de fluidos. Algunos de estos valores eran datos ya conocidos obtenidos de archivos y reportes de producción, mientras que otros fueron obtenidos mediante la utilización del porosímetro y celda triaxial de helio. En el anexo F se muestran los datos completos de la hoja de cálculo del porosímetro y celda triaxial de helio, la figura 4.5 muestra el equipo utilizado para dicho propósito.



Fig. 4.5 Porosímetro y celda triaxial de helio del CIGQ
(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)

A continuación se detalla en la tabla 3 los datos que cuentan con el aval del CIGQ utilizados en la hoja de cálculo para la determinación el nivel de limpieza.

Muestra	Prof (ft)	Swi	Vp	Peso muestra seca (gr)	ρ_{wi} (gr/cc)	API
1	9915-16	0,105	3,0622	39,0855	1,0154	27,4
2	9916-17	0,105	3,5613	40,4895	1,0154	27,4
3	9927-28	0,105	3,8559	38,4895	1,0154	27,4
4	9928-29	0,105	4,0246	38,6947	1,0154	27,4

Tabla 3. Datos petrofísicos y características de fluidos contenidos en los núcleos

(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)

Donde:

Prof.: Profundidad (pies)

Swi: Saturación de agua inicial

Vp: Volumen poroso (centímetros cúbicos)

ρ_{wi} : Densidad del agua inicial (gramos por centímetros cúbicos)

También se realizó la determinación de la permeabilidad horizontal de los núcleos mediante el permeámetro de nitrógeno, pese a que este parámetro no tendría intervención alguna de manera directa en los cálculos previstos. En el siguiente cuadro se detallan los valores de permeabilidad determinados. La hoja de cálculo del permeámetro se encuentra en el anexo G.

Muestra	Profundidad (pies)	k (md) = (Q*μ*L/P*A)
1	9915-16	524.80
2	9916-17	1571.97
3	9927-28	3522.14
4	9928-29	3952.13

Tabla 4. Permeabilidad de los núcleos

(Fuente: CIGQ – Petroproducción, Noviembre 2007)

Cálculos realizados.- Para obtener el porcentaje del petróleo removido al limpiar los núcleos con dos equipos diferentes como es el caso del limpiador de núcleos con CO₂ y el extractor soxhlet, fue necesario realizar cálculos orientados a este propósito, por lo tanto se aplicaron las siguientes formulas.

Porosidad

$$\Phi = \frac{V_p}{V_T} \quad 4.6$$

Volumen de agua inicial

$$V_{wi} = S_{wi} * V_p \quad 4.7$$

Masa de agua inicial

$$m_{wi} = \rho_{wi} * V_{wi} \quad 4.8$$

Masa de petróleo inicial

$$m_{Oi} = m.n.sat. - m_g - m_{wi} \quad 4.9$$

Volumen de petróleo inicial (Densidades y API a 60°F)

$$V_{Oi} = \frac{m_{Oi}}{\rho_o} ; \rho_o = SG_o * \rho_w ; SG = \frac{141.5}{131.5 + API} ; \rho_w = 1g/cm^3 \quad 4.10$$

Saturación de petróleo inicial

$$S_{Oi} = \frac{V_{Oi}}{V_p} \quad 4.11$$

Con el propósito de facilitar los cálculos y considerando que se trata de un valor muy pequeño, se ha supuesto que la masa de fluidos residuales corresponden a la masa de petróleo residual

$$m_{Or} = m.n.lavados - m_g \quad 4.12$$

Volumen de petróleo residual (Densidades y API a 60°F)

$$V_{Or} = \frac{m_{Or}}{\rho_o} ; \rho_o = SG_o * \rho_w ; SG = \frac{141.5}{131.5 + API} ; \rho_w = 1g/cm^3 \quad 4.13$$

Saturación de petróleo residual

$$S_{Or} = \frac{V_{Or}}{V_p} \quad 4.14$$

Porcentaje de limpieza considerando la masa del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{m_{or}}{m_{oi}}\right) * 100 \quad 4.15$$

Porcentaje de limpieza considerando el volumen del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{V_{or}}{V_{oi}}\right) * 100 \quad 4.16$$

Porcentaje de limpieza considerando la saturación del petróleo residual

$$\% = \left(1 - \frac{S_{or}}{S_{oi}}\right) * 100 \quad 4.17$$

Los porcentajes de limpieza en base a tres parámetros distintos se los realizó con el objetivo de comprobar la igualdad de los resultados en cada caso, en caso de obtener resultados distintos entre sí, se hubiere requerido de una revisión de dichos cálculos. Los resultados del los lavados realizados en la ESPOL se muestran en la tabla 5. La hoja de cálculo completa se encuentra en el anexo H.

Muestra	Prof (ft)	Φ_e (%)	K_{abs} (md)	m_{oi} (g)	m_{or} (g)	m_{or} (g)	Porcentaje de Limpieza = $(1 - (m_{or}/m_{oi})) \times 100$	
							L.N. CO ₂	Soxhlet
1	9915-16	17.05	524.8	0.4880	0,0145	0,0144	97,0287946	97,0492857
2	9916-17	18.83	1571.97	0.4308	0,0105	0,0104	97,5627017	97,5859141
3	9927-28	20.76	3522.14	0.4994	0,0105	0,0104	97,8974581	97,9174823
4	9928-29	21.33	3952.13	0.2762	0,0053	0,0052	98,0811647	98,1173692
						Prom.	97,6425298	97,6675128

Tabla 5. Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo removido utilizando los equipos de la ESPOL
(Fuente: Colón López, Enero 2008)

Donde:

Φ_e : Porosidad efectiva

K_{abs} : Permeabilidad absoluta (mildarcys)

m_{oi} : Masa de petróleo inicial (gramos)

m_{or} : Masa de petróleo residual (gramos)

L.N.CO₂: Limpiador de núcleos con CO₂

Tal como se observa en la tabla 5, los resultados de limpieza obtenidos con el extractor soxhlet, respaldan el nivel de limpieza que puede lograrse con el limpiador de núcleos con CO₂. La figura 4.6 muestra los núcleos saturados previo al lavado en el limpiador de núcleos con CO₂, la figura 4.7 muestra los núcleos luego del lavado.



CIB - ESPOL



Fig. 4.6 Núcleos saturados donados por el CIGQ (Antes)
(Fuente: Colón López, Enero 2008)



Fig. 4.7 Núcleos donados lavados en el limpiador de núcleos con CO₂ de la ESPOL (Después)
(Fuente: Colón López, Enero 2008)

4.6. Análisis de los resultados obtenidos

Análisis de resultados preliminares.- Los resultados obtenidos en las pruebas preliminares dieron pistas de una considerable capacidad

de limpieza que podía realizarse a núcleos que estuvieren saturados con petróleo.

En el caso de la primera prueba, cuyos resultados se encuentran en la tabla 1, se siguió al pie de la letra las indicaciones de operación del diseñador del limpiador de núcleos, sobre todo en lo relacionado con presiones y tiempo de remojo al que deben someterse las muestras, además el único parámetro utilizado para determinar si un núcleo había sido lavado, fue el peso que se registró antes y después de su paso por el limpiador de núcleos, esto se debió a que se trataba de un ensayo de prueba del equipo, además en el Laboratorio de Petróleos de la ESPOL no se dispone de núcleos con saturación original de fluidos, por lo que para la realización de las pruebas preliminares se optó por la resaturación de los núcleos con petróleo disponible en el laboratorio.

Bajo estas condiciones de saturación, se determinó en el primer ensayo que de un total de 24 núcleos, solo tres tuvieron un peso final superior al peso inicial, por lo tanto se comprobó que el equipo era capaz de remover el petróleo desde el interior de los poros de los núcleos y que los resultados obtenidos con un lavado podrían ser



CIB-ESPOL

mejorados realizando un segundo ensayo de dos lavados consecutivos con un mayor tiempo de remojo.

Evidentemente y tal como los resultados lo demuestran en la tabla 2 del subcapítulo anterior, se logró una mayor capacidad de limpieza realizando dos lavados consecutivos ya que todos los núcleos tuvieron un peso menor o igual al peso registrado antes del proceso considerando que la balanza utilizada tiene un error de $\pm 0.1g$.

Haciendo una comparación del peso de estos núcleos desde aquel registrado aún antes del primer lavado, hasta el peso registrado al final de las pruebas preliminares, se puede observar en la tabla 6 el cambio en el peso de los núcleos, por lo que estos alentadores resultados abrieron camino a la realización de un análisis más detallado en cuanto a la capacidad del equipo para limpiar el petróleo de los núcleos saturados con fluidos originales. La figura 4.8 muestra una comparación del peso de los núcleos al término de cada prueba preliminar.

w_i: Peso de los núcleos al inicio del proyecto
wf1: Peso final de los núcleos al término del primer ensayo
wf2: Peso final de los núcleos al término del segundo ensayo

Muestra	W _i (g)	Wf1 (g)	Wf2 (g)
1	27.0	26,4	26,1
2	36.2	36	36
3	38.2	37,9	37,9
4	27.4	27	27
5	30.6	30,2	30,2
6	39.1	38,7	38,8
7	31,6	31,9	31,6
8	31.7	31,3	31,2
9	38.8	38,5	38,5
10	36.7	36,5	36,4
11	32.7	32,4	32,4
12	34.6	34,3	34,3
13	33.1	32,8	32,9
14	35.5	35,3	35,3
15	35.6	35,3	35,3
16	27.7	27,4	27,3
17	29.2	29	28,9
18	35.4	35,2	35,2
19	35.6	35,4	35,4
20	134,5	132,4	132,7
21	42,4	42,9	42,4
22	111.3	109,7	109,5
23	156.0	154	151,6
24	145.7	148,2	145,8

Tabla 6. Comparación del peso de los núcleos durante las pruebas preliminares

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

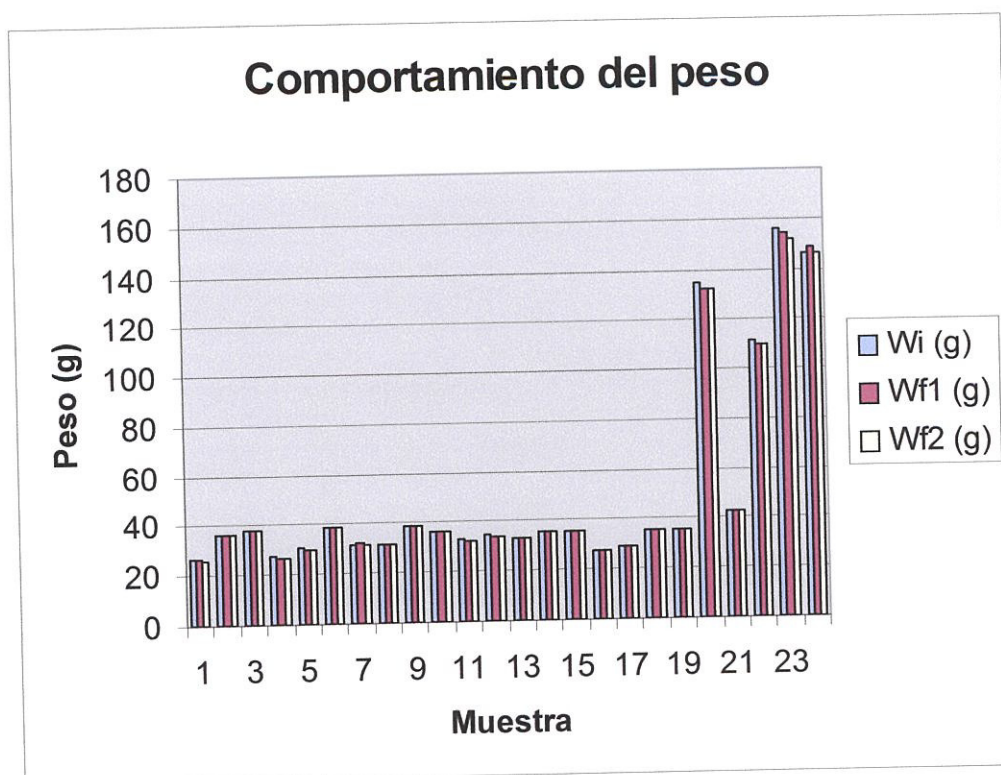


Fig. 4.8 Variación del peso de los núcleos luego de cada ensayo preliminar

(Fuente: Colón López, Octubre 2007)

Como se puede observar en el cuadro de barras de la figura 4.8, las barras amarillas correspondientes al último proceso de lavado preliminar conservan en muchos casos el menor peso registrado.

Durante las pruebas preliminares, se determinó que el tiempo que requiere el solvente para disminuir en gran medida la viscosidad del petróleo, era de 24 horas como mínimo, considerando un tiempo máximo razonable de 48 horas, también se determinó que un rango

de presión adecuado durante el remojo de los núcleos estaba entre 1050 y 1200 psi, éste rango de presión garantiza el estado líquido del CO₂ y su mezcla con el tolueno.

Análisis de resultados obtenidos en el Laboratorio de Petr6leos de la ESPOL.- Los resultados que se detallan en la tabla 5 del subcapítulo anterior pueden ser enfocados desde la perspectiva de la figura 4.9.

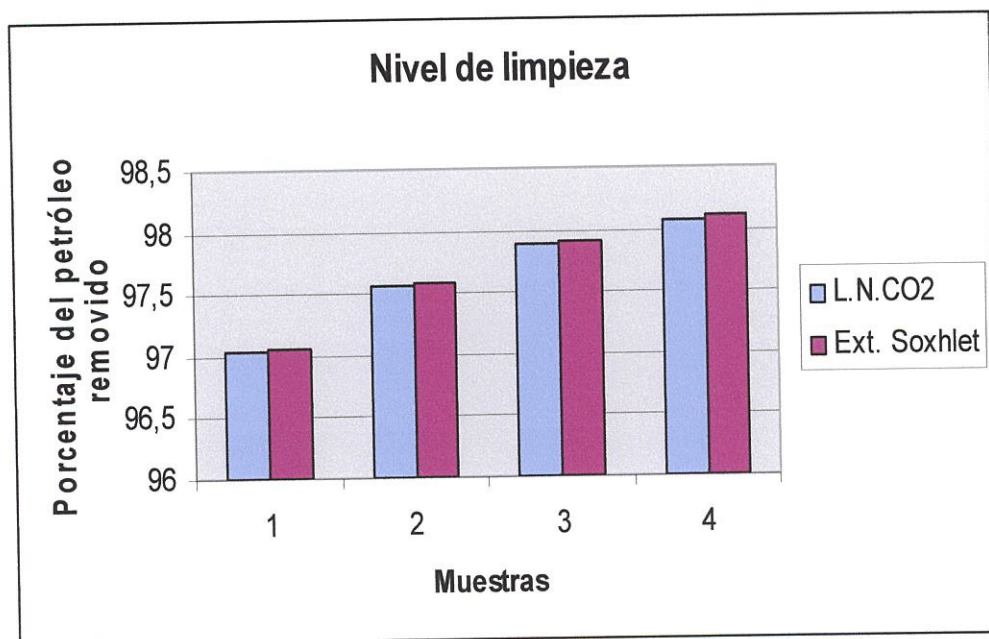


Fig. 4.9 Nivel de limpieza alcanzado con ambos métodos
(Fuente: Col6n L6pez, Enero 2008)

Observando los niveles correspondientes al porcentaje de petróleo removido, se ha calculado una diferencia que puede ser despreciable en cuanto a la efectividad de ambos métodos de lavado. Se estima que con cargas de dióxido de carbono mayores a 200 psi (350 psi, realizado en el CIGQ), los resultados en cuanto a la limpieza de núcleos mejoran ostensiblemente, esto no significa que trabajar con CO₂ como único solvente sea lo más recomendable ya que si éste fuere el caso, al gasificarse el CO₂ permitiría la concentración del petróleo y su consecuente aumento de viscosidad dentro de los poros de los núcleos, por esta razón, la mezcla de CO₂ con un solvente que permanezca en estado líquido a presión atmosférica contribuye a mantener baja la viscosidad del petróleo cuando la presión en la cámara haya disminuido, permitiendo así que el petróleo fluya con facilidad cuando el efecto de arrastre del CO₂ se manifieste. Una mayor cantidad de dióxido de carbono mezclado con tolueno acentuaría el efecto de arrastre mejorando el proceso de limpieza. También se debe tener presente que la mezcla de CO₂ con otro solvente, mejora las capacidades de limpieza de este gas en estado líquido para mezclarse con petróleos pesados.

Ventajas y desventajas del limpiador de núcleos con CO₂ con respecto al extractor soxhlet

Ventajas

- ✓ Es un equipo con una gran capacidad ya que puede albergar hasta 50 núcleos de una pulgada de diámetro y 3.8 centímetros de longitud. Mientras tanto el extractor soxhlet de mayor tamaño tiene una capacidad máxima de 10 muestras.
- ✓ Su capacidad volumétrica se traduce en ahorro de tiempo.
- ✓ El proceso no requiere de temperaturas elevadas por lo que no existe el riesgo de inflamación del solvente.

Desventajas

- ✓ Con la cámara de alta presión llena de núcleos, el sistema puede llegar a consumir no menos de medio galón de tolueno por lavado, siempre y cuando la carga de CO₂ sea de 100 psi.
- ✓ El sistema requiere de elevadas presiones por lo que su manejo corresponde exclusivamente a personas familiarizadas con el equipo.



CIB - ESPOL

4.7. Manual de procedimiento o guía del usuario

El formato del manual de operaciones tal como fue entregado a los usuarios del laboratorio en el cual se incluyen las fotos correspondientes a las partes del equipo y la numeración de las válvulas de control se encuentra en el anexo I.

Procedimiento de operación de la lavadora de núcleos con CO₂ del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL

Resumen de la calibración y ajustes previos a la operación

- 1) Conocer el estado en el que se encuentra el equipo y chequear que éste no se encuentre presurizado.
 - 2) Chequear el nivel de tolueno dentro del tanque, éste debe ser de al menos dos tercios la capacidad total del tanque.
 - 3) Conectar al regulador de aire de la bomba una fuente neumática con una presión de entre 100 a 150 psi.
 - 4) Chequear que la válvula check de la línea de carga del CO₂ esté instalada en el sentido del flujo desde la bombona hacia la cámara.
 - 5) Chequear que el regulador de la bombona de CO₂ tenga un rango de calibración que permita una carga de CO₂ de 100 a 200 psi.
-

- 6) Cuando el equipo esté en funcionamiento, la bomba hidráulica se detiene inmediatamente cuando la válvula de paso # 1 en el regulador de aire se cierra.

Resumen del procedimiento de limpieza de núcleos

- 1) Realizar el procedimiento de calibración y ajustes previo a la operación.
 - 2) Envolver los núcleos a ser lavados en una maya de nylon y depositarlos dentro de la cámara de alta presión.
 - 3) Ajustar fuertemente la tapa de la cámara y chequear que la válvula # 5 esté cerrada.
 - 4) Abrir la válvula # 4 al paso del CO₂ desde la bombona hacia la cámara.
 - 5) Iniciar la carga de CO₂ ajustando lentamente el regulador de la bombona a una presión que esté entre 100 y 200 psi (se recomiendan 200 psi), al finalizar la carga, chequear que las lecturas de los manómetros del regulador de la bombona y de la cámara de alta presión sean similares, posteriormente cerrar la válvula # 4.
 - 6) Mientras la válvula de paso # 1 en la salida del regulador de aire está cerrada, calibrar la presión de salida de aire del
-

regulador a 40 psi. No elevar la presión de salida del regulador a más de 50 psi.

- 7) Si el equipo no ha sido utilizado durante un largo periodo, es necesario entonces realizar una recirculación de tolueno, abrir la válvula # 2 de recirculación y direccionar la válvula # 3 al paso del fluido hacia la cámara de alta presión mientras la válvula # 4 permanece cerrada, abrir la válvula # 1 para iniciar el bombeo, durante la recirculación observar la mirilla del tanque de tolueno. Una vez realizada la recirculación, cerrar primero la válvula # 1 y luego la válvula # 2.
 - 8) Con la válvula # 2 cerrada y la válvula # 3 en dirección del flujo entre la bomba y la cámara, abrir la válvula # 1 para iniciar el bombeo del tolueno, observar con atención el manómetro sobre el pulsation dampener y al alcanzar los 200 psi abrir la válvula # 4 en el sentido de flujo desde la bomba hacia la cámara. Observar la presión en el manómetro de la cámara y al alcanzar 1200 psi cerrar primero la válvula # 1 y luego la válvula # 4.
 - 9) Observar la presión en la cámara durante varios minutos (al menos 30 minutos) ya que ésta empezará a declinar hasta estabilizarse, si cae por debajo de 1050 psi abrir primero la válvula # 4 y luego la válvula # 1 para reajustarla a 1200 psi,
-

luego cerrar la válvula # 1 y posteriormente la válvula # 4, se recomienda una presión de trabajo mínima de 1050 psi y máxima de 1200 psi.

- 10) Una vez que la presión en la cámara se ha estabilizado entre 1050 y 1200 psi, cerrar el paso del aire en el regulador y dejar los núcleos en remojo durante un lapso de tiempo de 24 a 48 horas.

Resumen del proceso de despresurización y drenaje del sistema

- 1) Colocar un recipiente en la salida de la válvula # 5 y abrirla lentamente, observar la caída de presión en el manómetro hasta un nivel de entre 100 a 200 psi y luego cerrarla.
- 2) Quitar con cuidado la válvula # 6 de la línea de drenaje y colocar en su lugar una manguera que lleve el tolueno contaminado hacia un recipiente colector, proceder a direccionar lentamente la válvula # 4 hacia la línea de drenaje.
- 3) Si el fluido drenado tiene un tono negruzco, proceder a realizar seguidamente un segundo proceso de lavado, caso contrario continuar con el paso 4. Mientras menos contaminado esté el fluido de desecho mayor será la limpieza de los núcleos.



CIB -ESPOL

- 4) Una vez que todo el tolueno ha sido drenado, abrir totalmente la válvula # 5 para cerciorarse que la salida de gases de la cámara ha cesado por completo, proceder a remover lentamente la tapa de la cámara.
- 5) Los núcleos lavados con este equipo salen de la cámara de alta presión parcialmente saturados de tolueno, razón por la cual deben ser secados en el horno de vacío durante 24 horas a una temperatura aproximada de 60 °C.

Una explicación pormenorizada de los pasos seguidos previos a la operación, durante la operación y durante la despresurización del equipo se detalla en los subcapítulos 4.2, 4.3 y 4.4 de ésta tesis.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. El trabajo de rehabilitación del equipo y la elaboración de la documentación técnica correspondiente han sido logrados exitosamente.
 2. Se obtienen resultados de limpieza de núcleos con una eficiencia promedio del 97.64 % en los ensayos realizados.
 3. Para obtener un alto nivel de limpieza, el tiempo de remojo de los núcleos en la cámara debe ser de 24 a 48 horas, con presiones que deben estar en un rango de 1050 a 1200 psi.
-

4. Con presiones de remojo de hasta 1200 psi no se presentan daños en la geometría o fracturas en los núcleos.
5. Con presiones de carga de CO₂ de 200 psi en la cámara de alta presión, se logran mejores resultados con el limpiador de núcleos del Laboratorio de Petróleos de la ESPOL.

Recomendaciones

1. Se recomienda usar el equipo una vez que se ha leído y entendido el manual de funcionamiento del mismo.
 2. La presión de alimentación de aire para el regulador de la bomba hidráulica no debe exceder de 150 psi.
 3. Se recomienda una presión hidráulica máxima de trabajo de 1200 psi en la cámara de alta presión.
 4. Se recomienda usar partes originales del limpiador de núcleos que cumplan con las especificaciones técnicas recomendadas por el fabricante.
-

5. Se recomienda usar al menos el 75% del volumen de la cámara de alta presión.
 6. No reutilizar solventes que hayan sido aplicados en anteriores procesos de lavado y que se encuentren altamente contaminados con petróleo.
 7. Para la lubricación de las partes internas de la bomba se recomienda el uso de grasas lubricantes de mecanismos plásticos o grasas ultraligeras. No se recomienda el uso de aceites.
-



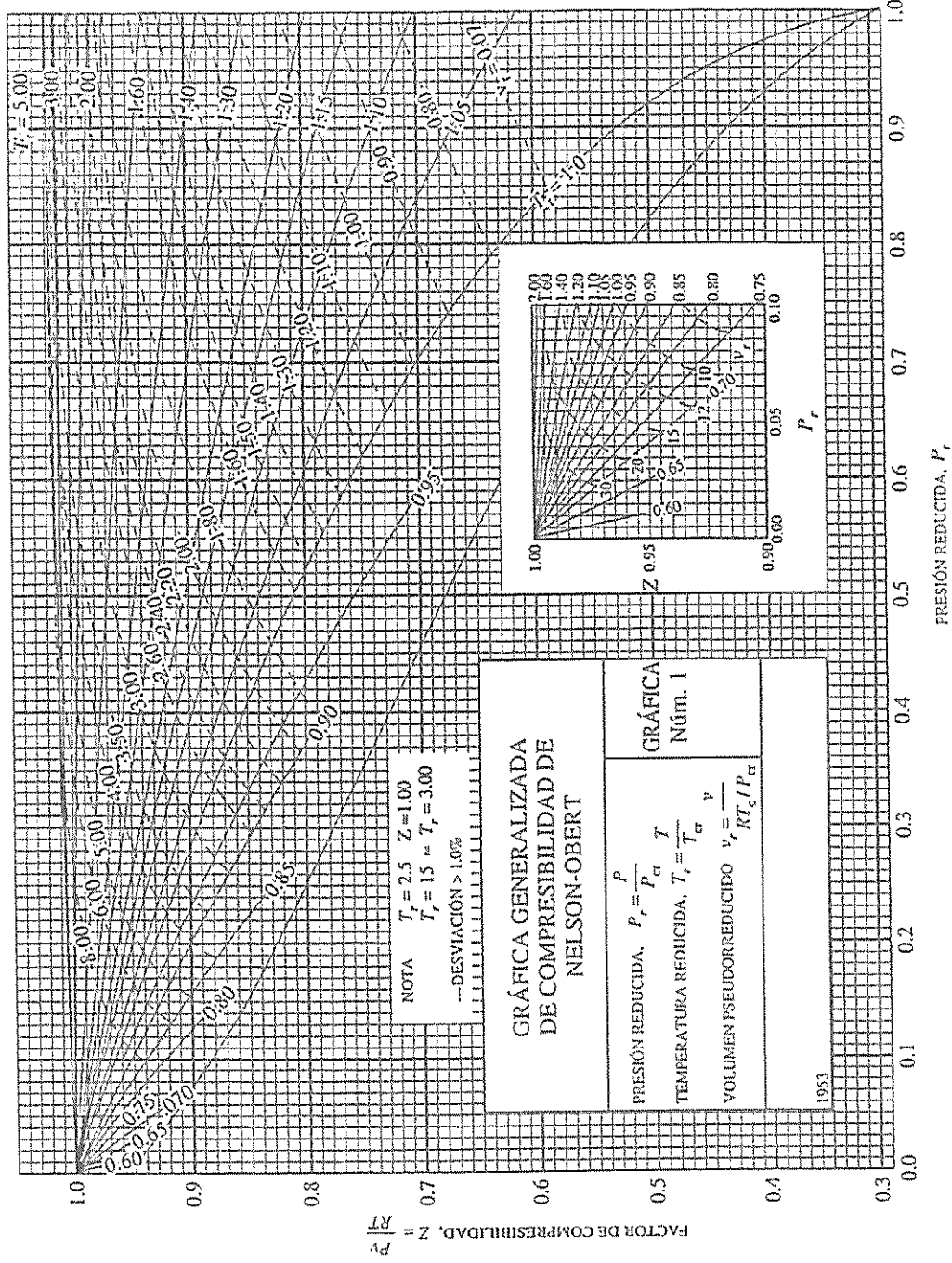
CIB -ESPOL

ANEXOS

ANEXO A

CARTA DEL FACTOR DE COMPRESIBILIDAD GENERALIZADO PARA BAJAS PRESIONES

a) $0 < P_r < 1.0$



Gráfica generalizada de compresibilidad de Nelson-Oberth—bajas presiones. (Empleadas con permiso del doctor Edward E. Oberth, Universidad de Wisconsin.)

ANEXO B

PARÁMETROS Y DATOS FÍSICOS QUÍMICOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO

Parámetro	Observaciones	Sistema Métrico	Sistema US
Formula química		CO ₂	CO ₂
Masa Molar	u.m.a.	44.01	44.01
Fase Líquida (a punto ebullición)	Gravedad específica (agua=1)	1.18 @ 1.013 bar	1.18 @ 1 atm
Punto Ebullición	Temperatura	-78.5 °C @ 1.013 bar	-109.3 ^a °F @ 1 atm
	Calor latente de vaporización	571.3 kJ / kg	245.5 b BTU / lb
Fase Gaseosa	Gravedad específica (Aire=1)	1.539	1.524
	Capacidad calorífica específica	0.85 kJ / kg °C	0.199 BTU / lb °F
	Densidad	1.9769 kg / m ³	0.12341 lb / cu. Ft
Punto Triple	Temperatura	-56.6 °C	-69.9 °F
	Presión	517.3 kPa abs	75.1 psia
Punto Crítico	Temperatura	31.1 °C	87.9 °F
	Presión	7382 kPa abs	1070.6 psia
	Densidad	468 kg / m ³	29.2 lb / cu. Ft
Conductividad Térmica		0.0168 W / m °K @ 300 °K	0.00971 BTU / Ft h °F @ 80 °F

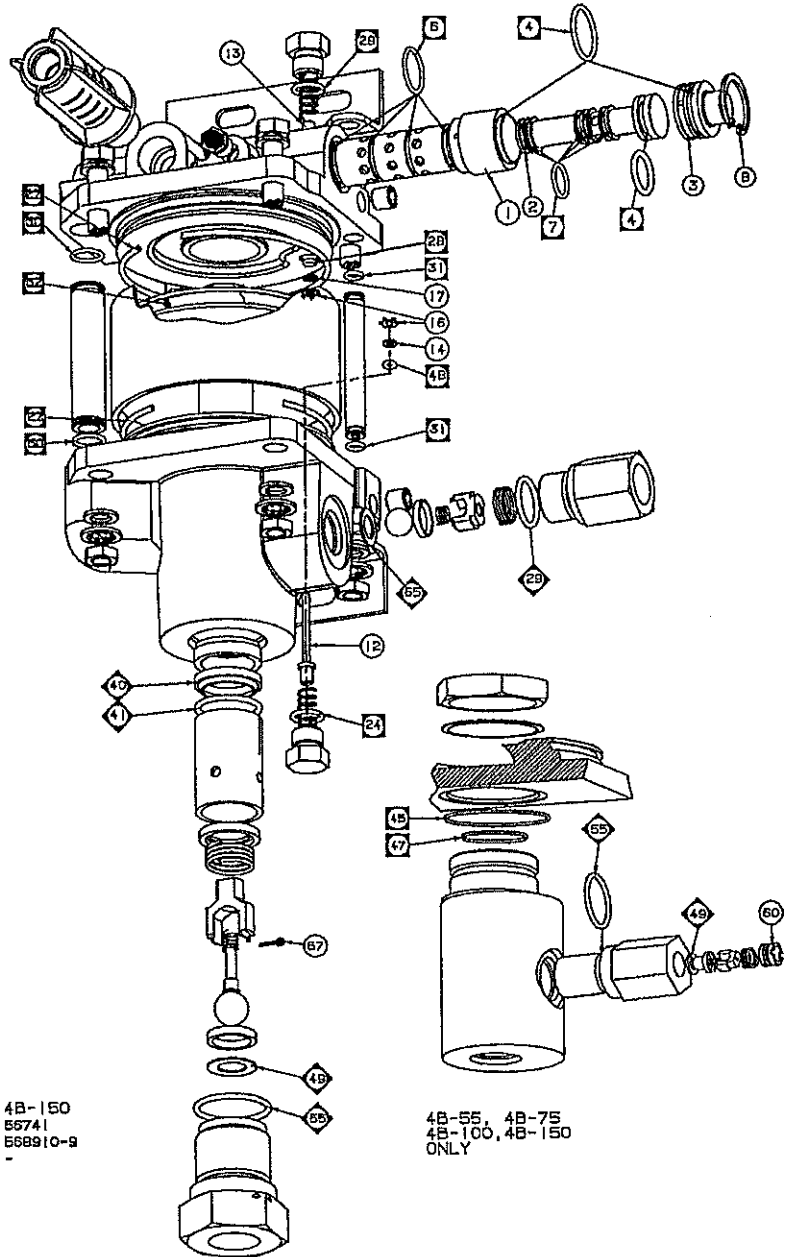
ANEXO C

PROPIEDADES FÍSICO QUÍMICAS DEL TOLUENO

Identificación del solvente	
Nombre químico	Tolueno
Sinonimos	Metilbenceno/ Fenilmetanol/ Toluol
Nº CAS	108-88-3
Formula	$C_6H_5CH_3/C_7H_8$
Propiedades físico químicas	
Aspecto y color	Liquido incoloro
Olor	Aromatico caracteristico (agradable)
Presion de vapor	2.9 Kpa a 20°C
Densidad relativa de vapor (aire=1)	3.2
Solubilidad en agua	Muy poco soluble en agua 0.52 g/l
Punto de ebullicion	111°C
Punto de fusion	-95 °C
Peso molecular	92.1g/mol
Densidad	0.8669 g/ml a 20°C
Presion de vapor a 30°C	37.7 mm de Hg
Índice de refracción a 20°C	1.49
Punto de inflamación en copa cerrada	4°C
Temperatura de auto ignicion	530 - 600°C
Limites de explosividad	1.27 - 7% en volumen de aire
Temperatura critica	318.64°C a 40.55 atm (596.085 psi)
Tension superficial	27.92 mN/m a 25°C

ANEXO D

DIAGRAMA Y LISTA DE PARTES DE LA BOMBA HIDRÁULICA



ITEM NO.	QTY	DESCRIPTION	PART No.
CYCLING VALVE	1	SLEEVE	56216
	2	SPUD	55727
	3	PLUG	56216
	4	O RING	568021-2
	5	O RING	568115-2
	6	O RING	568018-2
	7	O RING	56285
	8	RETAINER	N5000-106H
AIR PILOT VALVE	12	STEM	27375-3
	13	STEM	27375-5
	16	RETAINER-TRJ ARC	5005-31H
	17	SPACER	16517
	28	O RING	568006-2
29	O RING	568906-9	
AIR DRIVE	27	O RING	568154-2
	30	O RING	568014-2
	31	O RING	568010-2
	32	O RING	56225
INLET CHECK	49	SEAT	4B-14 4B-37 28633 28119 56741
	55	O RING	568124-2 568912-9 568910-9
	57	COTTER PIN	821665-1002 -
			4B-14 4B-37 4B-21 4B-55 4B-25 4B-75 4B-30 4B-100 4B-150
			4B-14 4B-37 4B-21 4B-55 4B-25 4B-75 4B-30 4B-100 4B-150
OUTLET CHECK	65	SEAT	28119 28081-3
	57	O RING	568910-9 568908-9
	60	RETAINER	- 55285
PUMP SECTION	39	BEARING	4B-14 4B-21 4B-25 4B-30 4B-37 4B-55 4B-75 4B-100 4B-150
	40	SEAL	56222-14 56222-21 56222-25 56222-20 56222-37 56731-55 56731-75 56731-100 56731-150
	41	O RING LOADER	56740-14 56740-21 56740-25 56740-20 56740-37 56740-55 56740-75 56740-100 56740-150
	42	SPACER	568121-2 568118-2 568117-2 568116-2 568115-2 568113-2 568112-2 568111-2 568110-2
	43	O RING	57313 57314 57315 57316 57317 57318 57319 57320 57321
	45	O RING	- - - - - 568030-2 568030-2 568030-2 568030-2
	47	O RING	- - - - - 568110-2 568110-2 568110-2 568110-2
SEAL KIT	□	AIR DRIVE	4B-14 4B-21 4B-25 4B-30 4B-37 4B-55 4B-75 4B-100 4B-150
	◇	HYD. SECT.	57340 57340 57340 57340 57340 57340 57340 57340 57340

4B-55, 4B-75
4B-100, 4B-150
ONLY

▲ APPLY VERY LIGHT COATING OF HASKEL LUBRICANT (P/N 28442) TO DYNAMIC SEALS IN AIR DRIVE SECTION.

NOTES:

-PART LIST- AIR DRIVEN LIQUID PUMPS 4B SERIES

Haskel HASKEL, INC.
100 EAST GRAHAM PLACE
BURBANK, CA. 91502 U.S.A.
(818) 543-4000

ANEXO E

DETALLES DE VÁLVULAS DE TRES VÍAS CORRESPONDIENTE A LA FIGURA 3.15



CIB-ESPOL

Tamaño de Terminales	Modelo	orificio	Dimensiones									
			A	B	C	D	F	G	H	J	W	
1/4"	SS-42X-S4	0.125"	2.21"	1.10"	1.07"	0.34"	1.13"	1/4"	19/32"	1.36"	0.58"	
1/4"	SS-43XS4-S4-M4	0.187"	2.39"	1.20"	1.03"	0.44"	1.53"	3/16"	25/32"	1.47"	0.78"	

ANEXO F

POROSIDAD DE NÚCLEOS EXTRAIDOS DE LA FORMACIÓN HOLLIN INFERIOR DE UN POZO DEL CAMPO SACHA DE LA

CUENCA ORIENTE DEL ECUADOR

RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL POROSIMETRO Y CELDA TRIAXIAL DE HELIO DEL CIGQ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Muestra	Profundidad (pies)	Díametro copa (pulg)	Vol. Conex. (cc)	Discos no usados	Vol. Discos no usados (sum)	Lectura porosímetro (cc)	Volumen granos (cc) 6-(7-4)	Vol conex. Hidrostático (cc) @ 800psi	Lectura porosímetro @ 800psi	Volumen poroso (cc) (10-9)	Vol. Poroso+ Vol. granos (11+8) = VT (cc)	Peso muestra seca (g)	Densidad del grano (g/cc) (13-8)	Porosidad (%) (11-12)*100
1	9915-16	2,54	5,05	1,3,4	20,7303	10,7	14,8964	11	14,062	3,062	17,9586	39,0855	2,62362048	17,0514238
2	9916-17	2,54	5,05	1,3,4	20,7303	10,7	15,3424	11	14,561	3,561	18,9055	40,4895	2,63874061	18,8371555
3	9927-28	2,54	5,05	1,3,4	20,7303	10,9	14,7193	11	14,855	3,856	18,5678	38,4895	2,61621069	20,7664414
4	9928-29	2,54	5,05	1,3,4	20,7303	11,4	14,8393	11	15,024	4,025	18,8642	38,6947	2,60752557	21,334442

ANEXO G

PERMEABILIDAD DE NÚCLEOS EXTRAIDOS DE LA FORMACIÓN HOLLIN INFERIOR DE UN POZO DEL CAMPO SACHA DE LA CUENCA ORIENTE DEL ECUADOR

RESULTADOS OBTENIDOS UTILIZANDO EL PERMEAMETRO DE NITRÓGENO DEL CIGQ

Mtra.#	Profundidad (pies)	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Lectura del fluómetro	Lectura gráfica (Q)	Temperatura (°F)	Presión (atm)	Lectura gráfica (m)	K (md) = $(Q^2 \cdot m^4 / P^2 \cdot A)$
1	9915-16	3,681	2,509	1,7	10	74	0,25	0,01762226	524,8029424
2	9916-17	3,799	2,508	4,3	29	74	0,25	0,01762226	1571,969059
3	9927-28	3,857	2,508	8,3	64	74	0,25	0,01762226	3522,137571
4	9928-29	3,749	2,51	9,4	74	74	0,25	0,01762226	3952,132385

ANEXO H

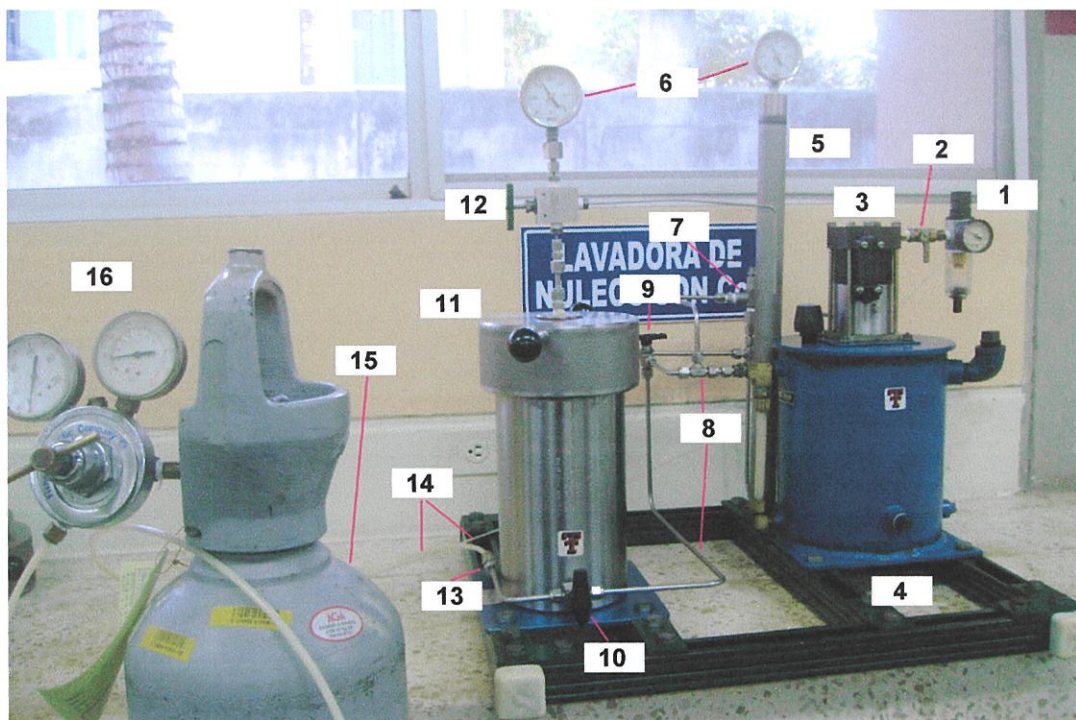
PORCENTAJE DE LIMPIEZA DE LOS NÚCLEOS LAVADOS CON LOS EQUIPOS DE LA ESPOL

		Datos										12					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		11				
Muestra	Prof (ft)	Masa Nucleos Saturados	Masa Nucleos Lavados con CO2	Masa nucleos lavados con soxhlet	Swi	Vp	pwi (gr/cc)	Peso muestra seca (gr)	API	po=SGox1gr/cm3	Vwi	mwi	moi				
1																	
										(141,5/131,5+(8))x1		(6x10)	(1-7-11)				
1	9915-16	39.9	39.1	39.0999	0.105	3.062	1.0154	39.0855	27.4	0.890497168	0.321531	0.32648258	0.488017423				
2	9916-17	41.3	40.5	40.4999	0.105	3.561	1.0154	40.4895	27.4	0.890497168	0.3739365	0.37969512	0.430804878				
3	9927-28	39.4	38.5	38.4999	0.105	3.856	1.0154	38.4895	27.4	0.890497168	0.4048695	0.41110449	0.49939551				
4	9928-29	39.4	38.7	38.6999	0.105	4.025	1.0154	38.6947	27.4	0.890497168	0.422583	0.42909078	0.276209222				
		L.N.CO2	Ext. Soxhlet	L.N.CO2	Ext. Soxhlet	L.N.CO2	Ext. Soxhlet	L.N.CO2	Ext. Soxhlet	L.N.CO2	Ext. Soxhlet	L.N.CO2	Ext. Soxhlet				
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26				
(12/9)	(13/5)	(2-7)	(3-7)	(15/9)	(16/9)	(17/5)	(18/5)	(1-15/12)x100	(1-16/12)x100	(1-17/13)x100	(1-18/13)x100	(1-19/14)x100	(1-20/14)x100				
Voi	Soi	mor	mor	Vor	Vor	Sor	Sor	Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo removido	Porcentaje de limpieza en base a la masa del petróleo removido	Porcentaje de limpieza en base al volumen del petróleo removido	Porcentaje de limpieza en base a la saturación del petróleo removido	Porcentaje de limpieza en base a la saturación del petróleo removido					
0.54802805	0.1789655	0.0145	0.0144	0.01628304	0.016170742	0.00531743	0.00528076	97.0287946	97.04928567	97.0287946	97.04928567	97.0287946	97.04928567				
0.48378018	0.1358437	0.0105	0.0104	0.01179117	0.011678869	0.00331092	0.003279384	97.56270169	97.58591406	97.56270169	97.58591406	97.56270169	97.58591406				
0.56080528	0.1454408	0.0105	0.0104	0.01179117	0.011678869	0.00305795	0.003028831	97.89745807	97.91748228	97.89745807	97.91748228	97.89745807	97.91748228				
0.31017417	0.0770696	0.0053	0.0052	0.00595173	0.005839435	0.00147884	0.001450935	98.08116472	98.11736916	98.08116472	98.11736916	98.08116472	98.11736916				
													Promedio	97.66751279	97.66751279	97.66751279	97.66751279

ANEXO I

PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN DE LA LAVADORA DE NÚCLEOS CON CO₂ DEL LABORATORIO DE PETRÓLEOS DE LA ESPOL

PARTES DEL EQUIPO



1. Regulador de presión neumática con filtro
2. Válvula de paso del aire
3. Bomba hidráulica
4. Tanque de deposito del tolueno
5. Pulsation dampener
6. Medidores de presión
7. Válvula de recirculación
8. Líneas de flujo hidráulicas
9. Válvula de tres vías de líneas de flujo
10. Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
11. Cámara de alta presión
12. Válvula de alivio
13. Válvula check (Ingreso del CO₂)
14. Líneas de flujo de gases (CO₂ y aire)
15. Bombona de CO₂
16. Regulador de presión del tanque de CO₂

NUMERACIÓN DE LAS VÁLVULAS



1. Válvula de paso
2. Válvula de recirculación
3. Válvula de tres vías de las líneas de flujo
4. Válvula de tres vías de la cámara de alta presión
5. Válvula de alivio
6. Válvula check

Resumen de la calibración y ajustes previos a la operación

- 1) Conocer el estado en el que se encuentra el equipo y **chequear que éste no se encuentre presurizado.**
- 2) Chequear el nivel de tolueno dentro del tanque, éste debe ser de al menos **dos tercios la capacidad total del tanque.**
- 3) Conectar al regulador de aire de la bomba una **fuentes neumática con una presión de entre 100 a 150 psi.**
- 4) Chequear que la válvula check de la línea de carga del CO₂ **esté instalada en el sentido del flujo desde la bombona hacia la cámara.**
- 5) Chequear que el regulador de la bombona de CO₂ tenga un **rango de calibración que permita una carga de CO₂ de 100 a 200 psi.**
- 6) Cuando el equipo esté en funcionamiento, **la bomba hidráulica se detiene inmediatamente cuando la válvula de paso # 1 en el regulador de aire se cierra.**

Resumen del procedimiento de limpieza de núcleos

- 1) Realizar el procedimiento de calibración y ajustes previo a la operación.
 - 2) Envolver los núcleos a ser lavados en una maya de nylon y depositarlos dentro de la cámara de alta presión.
 - 3) **Ajustar fuertemente la tapa de la cámara** y chequear que la válvula # 5 esté cerrada.
 - 4) Abrir la válvula # 4 al paso del CO₂ desde la bombona hacia la cámara.
-

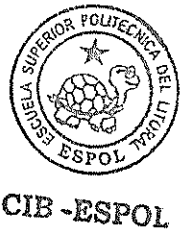
- 5) Iniciar la carga del CO₂ ajustando lentamente el regulador de la bombona a una **presión que esté entre 100 y 200 psi (se recomiendan 200 psi)**, al finalizar la carga, **chequear que las lecturas de los manómetros del regulador de la bombona y de la cámara de alta presión sean similares**, posteriormente cerrar la válvula # 4.
 - 6) **Mientras la válvula de paso # 1 en la salida del regulador de aire está cerrada, calibrar la presión de salida de aire del regulador a 40 psi. No elevar la presión de salida del regulador a más de 50 psi.**
 - 7) **Si el equipo no ha sido utilizado durante un largo periodo, es necesario entonces realizar una recirculación de tolueno**, abrir la válvula # 2 de recirculación y direccionar la válvula # 3 al paso del fluido hacia la cámara de alta presión **mientras la válvula # 4 permanece cerrada**, abrir la válvula # 1 para iniciar el bombeo, durante la recirculación **observar la mirilla del tanque de tolueno**. Una vez realizada la recirculación, **cerrar primero la válvula # 1 y luego la válvula # 2.**
 - 8) **Con la válvula # 2 cerrada y la válvula # 3 en dirección del flujo entre la bomba y la cámara, abrir la válvula # 1 para iniciar el bombeo del tolueno, observar con atención el manómetro sobre el pulsation dampener y al alcanzar los 200 psi abrir la válvula # 4 en el sentido de flujo desde la bomba hacia la cámara. Observar la presión en el manómetro de la cámara y**
-

al alcanzar 1200 psi cerrar primero la válvula # 1 y luego la válvula # 4.

- 9) **Observar la presión en la cámara durante varios minutos (al menos 30 minutos) ya que ésta empezará a declinar hasta estabilizarse, si cae por debajo de 1050 psi abrir primero la válvula # 4 y luego la válvula # 1 para reajustarla a 1200 psi, luego cerrar la válvula # 1 y posteriormente la válvula # 4, se recomienda una presión de trabajo mínima de 1050 psi y máxima de 1200 psi.**
- 10) **Una vez que la presión en el sistema se ha estabilizado entre 1050 y 1200 psi, cerrar el paso del aire en el regulador y dejar los núcleos en remojo durante un lapso de tiempo de 24 a 48 horas.**

Resumen del proceso de despresurización y drenaje del sistema

- 1) **Colocar un recipiente en la salida de la válvula # 5 y abrirla lentamente, observar la caída de presión en el manómetro hasta un nivel de entre 100 a 200 psi y luego cerrarla.**
- 2) **Quitar con cuidado la válvula # 6 de la línea de drenaje y colocar en su lugar una manguera que lleve el tolueno contaminado hacia un recipiente colector, proceder a direccionar lentamente la válvula # 4 hacia la línea de drenaje.**
- 3) **Si el fluido drenado tiene un tono negruzco, proceder a realizar seguidamente un segundo proceso de lavado, caso**



contrario continuar con el paso 4. **Mientras menos contaminado esté el fluido de desecho mayor será la limpieza de los núcleos.**

- 4) Una vez que todo el tolueno ha sido drenado, **abrir totalmente la válvula # 5 para cerciorarse que la salida de gases de la cámara ha cesado por completo, proceder a remover lentamente la tapa de la cámara.**
 - 5) Los núcleos lavados con este equipo salen de la cámara de alta presión parcialmente saturados de tolueno, razón por la cual **deben ser secados en el horno de vacío durante 24 horas a una temperatura aproximada de 60 °C.**
-

ANEXO J

CERTIFICADO DE PASANTÍA REALIZADA EN PETROPRODUCCIÓN



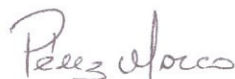
EL ECUADOR HA SIDO, ES
Y SERÁ PAÍS AMAZÓNICO

Quito, a 07 de diciembre del 2007

CERTIFICADO

A petición del interesado, Señor **Colón Eloy López Franco**, con Cédula de Identidad **No. 0918873076**, certifico que el mencionado realizó una pasantía en el Área de Yacimientos del Centro de Investigaciones Geológicas Quito de Petroproducción entre el 07 de noviembre hasta el 07 de diciembre del 2007, tiempo en el cual ha demostrado ser una persona honorable, con un alto sentido de colaboración, don de gentes y un alto grado de responsabilidad. Motivos por los cuales ha ganado el aprecio y estima de quienes lo conocemos.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, pudiendo el interesado dar el uso al presente certificado como más le convenga.



Ing. Marco Pérez Dávila

Centro de Investigaciones Geológicas Quito

C.I. No. 1704692480

Teléfonos: 2861274, 2860409 al 412, 091040256, 096022376

BIBLIOGRAFÍA

1. Control de activos fijos de la ESPOL, tarjeta emitida el 27 de Julio del 2007
 2. Forrest F. Craig Jr., Aspectos de Ingeniería de la Inyección de Agua, capítulo 2, Society of Petroleum Engineers of AIME, Dallas, 1982
 3. Gallegos Orta Ricardo, Recuperación Mejorada por Inyección de Agua, capítulo 2, 2000
 4. B.C.Craft and M.F. Hawkins, Applied Petroleum Reservoir Engineering, segunda edición, capítulo 1, 1991
-

5. Propiedades de la Roca Yacimiento, Clasificación de la Porosidad,
<http://www.dasilvasystems.com/cursos/propiedades-roca-yacimiento/clasificacion-porosidad.html>, 2007

 6. Carrillo Barandiaran Lucio, SPE paper, Descripción del Reservorio,
<http://cuyo.spe.org/images/cuyo/articles/43/Descripci%F3nReservorio.pdf>,
capítulo 2, 2006

 7. Schlumberger-Seed, Porosidad-Preguntas por Temas,
<http://www.seed.slb.com/qa2/FAQView.cfm?ID=914&Language=ES>, 2007

 8. Frank. H., Validación de las Pruebas PVT para Sistemas de Gas
Condensado, Porosidad, http://industria-petrolera.blogspot.com/2007_11_01_archive.html, 2007

 9. Jacob Bear, Professor of Israel Institute of Technology, Darcy's Law,
lecture 1, <http://www.cmdlet.com/demos/mgfc-course/mgfcdarcy.html>,
2007
-

10. Ocean Drilling Program, Consolidation Tests, http://www-odp.tamu.edu/publications/207_SR/114/114_3.htm, 2007
 11. Charles Robert Smith, Mechanics of Secondary Oil Recovery, capítulo 3, 1985
 12. Tecnología Mendoza, Producción de petróleo, http://www.tecnologia.mendoza.edu.ar/trabajos_alumnos/pasantes/pagina/PETROLEO.htm, 2007
 13. Agat Laboratorios, Presión capilar, <http://www.agatlabs.ca/Spanish/content/capillarypressure.htm>, 2007
 14. Carrillo Barandiarán Lucio, Presión Capilar, Mojabilidad y Saturación, <http://quipu.uni.edu.pe/OtrosWWW/webproof/acade/fipp/lucioc/mojabilidad101.html>, 2007
 15. Wikipedia, Gas, <http://es.wikipedia.org/wiki/Gas>, 2007
 16. Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, Termodinámica, cuarta edición, 2003
-

17. Narsavage-Heald Donna, Chemistry department, University of Scranton,
Diseño y aplicación de dispersantes para el dióxido de carbono,
<http://academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/generalchemistry/generalmodulespan.html>, 2007

 18. The critical point, Non Ideal Fluid Behavior, topic 4,
www.sci.uidaho.edu/geol555/PDF/lectures_pdf/GEOL555_Topic_4.pdf,
2007

 19. Atomos y Moléculas, capitulo 1,
<http://www.educa.aragob.es/iescarin/depart/biogeo/varios/BiologiaCurtis/Seccion%201/1%20-%20Capitulo%201.htm>, 2007

 20. Braga Liliana, Dióxido de Carbono, Enciclopedia - CRICYT,
<http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/DioxiCar.htm>, 2007

 21. Estrucplan, El Dióxido de Carbono y sus Aplicaciones,
<http://www.estrucplan.com.ar/Secciones/extintores/dioxido2.htm>, 2007
-

22. Química Ayuda, El CO₂ y sus fases, <http://quimica.ayuda-gratis.com/CO2+y+sus+Fases/>, 2007
23. Recursos en Red, El Dióxido de carbono, http://www.fq.profes.net/especiales2.asp?id_contenido=44796, 2007
24. Wikipedia, Fluidos supercríticos, http://es.wikipedia.org/wiki/Fluido_supercr%C3%ADtico, 2007
25. Tecnociencia, <http://www.tecnociencia.es/especiales/cambioclim/3.htm>, 2007
26. Air Liquide España, Ficha de Datos de Seguridad # 018A-1del CO₂, http://www.es.airliquide.com/fichas_seg/gases_puros_pdf/020_DIOXIDO_CARBONO.pdf, 2004
27. AGA S.A, Hoja de Seguridad del Material CO₂ Comprimido, www.aga.com, 2007
-

28. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, Fichas Internacionales de Seguridad Química, Ficha del CO₂ # ICSC 0021, <http://www.mtas.es/insht/ipcsnspn/nspn0021.htm>, 2007
29. Boc Gases, Hoja de Datos de Seguridad de Materiales, hoja del CO₂ # MSDS G-99, http://www.nuco2.com/files/safety/MSDS_Spanish_CO2_Liquido.pdf, 1996
30. Wikipedia, Tolueno, <http://es.wikipedia.org/wiki/Tolueno>, 2007
31. Agency for Toxic Substances & Disease, Registry, Tolueno, http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts56.html, 2007
32. Eco - Sur, Tolueno, http://www.ecosur.net/sust._varias/tolueno.html, 2007
33. New Jersey Department of Health and Senior Services, Hoja Informativa Sobre Substancias Peligrosas, tolueno, <http://nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/1866sp.pdf>, 1998



CIB - ESPOL

34. Haskel International Inc., Liquid pump catalog, www.haskel.com, 2007

 35. Wikipedia, Pressure Measurement,
http://en.wikipedia.org/wiki/Pressure_measurement, 2007

 36. Omega Engineering Technical References, Pressure Gauges,
<http://www.omega.com/prodinfo/pressuregauges.html>, 2007

 37. Swagelok, One Piece Instrumentation Ball Valves, catalog,
www.swagelok.com, 2007

 38. High Pressure Equipment Company, Taper Seal Valves, Fittings and
Tubing, www.highpressure.com, 2007

 39. Frost & Sullivan Research Service, North American Pneumatic Filters /
Regulators / Lubricators and Accessories Markets,
<http://www.frost.com/prod/servlet/report-brochure.pag?id=F170-01-00-00-00#report-technologies>, 2005
-